

Метод измерения поглощенной энергии в электрических разрядах наносекундной длительности

Л. М. Василяк, А. В. Красночуб

Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская, 13, строение 2, г. Москва, 125412, Россия, e-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Описан метод измерения поглощенной энергии в нелинейной нагрузке с помощью шунта обратного тока. Рассмотрены конструктивные отличия шунта обратного тока и особенности его применения для исследований высоковольтных (10–100 кВ) импульсов наносекундной длительности. Приведены экспериментальные результаты использования данного метода для исследования поглощения энергии при высоковольтном импульсном разряде в газе.

Ключевые слова: токовый шунт, наносекундное временное разрешение, измерение поглощенной энергии, высоковольтные импульсы напряжения, наносекундный импульсный электрический разряд.

УДК 533.9.07

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные импульсы наносекундной длительности используются для создания низкотемпературной плазмы с высокой концентрацией возбужденных и ионизованных частиц [1] в лазерах, источниках света и ультрафиолетового излучения, коммутаторах [2] и других устройствах, например для диагностики ударных волн и управления скоростью горения газовых смесей [3]. Именно с помощью импульсного высоковольтного разряда можно создать плазму с высокими значениями электрического поля и наработать значительное количество радикалов, возбужденных частиц и ионов без существенного нагрева газа. В [4] показано, что благодаря импульсному высоковольтному разряду, в сравнении со стационарным, при его одинаковой средней мощности можно увеличить концентрацию атомов ртути в возбужденном состоянии 6^3P_1 более чем в 10 раз. Оптимизация характеристик электрического разряда для прикладных задач требует знания величины вложенной в него энергии. Диссипацию последней при электрическом пробое пытаются определить как непосредственно при экспериментальных исследованиях [5], так и расчетным путем [6]. Применение высокоразвитой техники высоковольтных измерений [7] при работе с короткими импульсами наносекундной длительности затруднено. Это связано с тем, что при измерении импульсных сигналов с высокими скоростями роста напряжения ($\sim 10^{12}$ – 10^{13} В/с) возникают искажения измеряемого сигнала в системе диагностики на монтажных емкостях и индуктивностях, на измерения влияют значительные электромагнитные наводки, при воздействии на нелинейную нагрузку диссипация энергии происходит с разной скоростью за время воздействия импульса

напряжения. Для вычисления диссипации энергии необходимо одновременно измерять ток и напряжение, что не всегда можно сделать в силу конструктивных особенностей того или иного устройства. Однако при достаточно коротких импульсах наносекундной длительности, которые подводятся к нагрузке по передающей линии с постоянным волновым сопротивлением, связь между током и напряжением задается волновым сопротивлением линии, поэтому достаточно измерять только один параметр – ток или напряжение в линии. Другим важным свойством длинной передающей линии является отражение энергии от несогласованной нагрузки обратно в линию. На этом свойстве основан метод импульсной рефлектометрии для определения расстояния до мест повреждений кабельных линий. По виду отраженного сигнала можно также установить вид повреждения кабеля, например обрыв или повреждение изоляции. В случае линий с малым затуханием или достаточно коротких линий, когда потери в линии достаточно малы, а также мало искажение формы наносекундного импульса, можно определить величину энергии, поглощенной в несогласованной нагрузке, если сравнить энергии начального импульса и импульса, отраженного от нагрузки. Данная работа посвящена разработке бесконтактного метода измерения поглощенной энергии в импульсных электрических разрядах наносекундной длительности, которые служат нелинейной нагрузкой для передающей линии.

ОСНОВЫ МЕТОДА

Используемый метод измерения энергии, поглощенной в нелинейной нагрузке, например импульсном электрическом разряде, основан на свойствах отражения электромагнитного сигнала

ла, идущего по длинной передающей линии от несогласованной нагрузки [8]. Для длинной передающей линии связь между волновым сопротивлением Z , током I и напряжением U задается соотношением $U = IZ$. Таким образом, используя линию с известным Z , достаточно измерять только ток. Электрическая мощность бегущего по линии импульса $P = IU = ZI^2 = U^2/Z$. Энергия импульса $W = \int I^2(t)Z dt$.

Если нагрузка не согласована с передающей линией, то часть энергии электрического импульса отражается от нее. Нелинейная нагрузка не всегда согласована с передающей линией, и всегда часть энергии будет отражаться. Если измерить энергию импульса, идущего к нагрузке, и энергию импульса, отраженного от нагрузки, то их разность даст величину поглощенной энергии: $\Delta W = \int I_i^2(t)Z dt - \int I_r^2(t)Z dt$, где $I_i(t)$ и $I_r(t)$ – токи падающего импульса и отраженного от разрядной ячейки импульса соответственно. Здесь рассмотрен частный, но широко распространенный на практике случай короткозамкнутой нелинейной нагрузки. В общем случае при вычислении энерговклада надо учитывать прошедший импульс.

Для корректного применения данного метода следует обратить особое внимание ещё на три принципиальных момента: во-первых, необходимо использовать для передачи импульсов напряжения от генератора к нагрузке линию с заведомо постоянным волновым сопротивлением; во-вторых, длину передающей линии и место расположения датчика в ней нужно выбирать таким образом, чтобы падающий и отраженный импульсы не накладывались друг на друга, однако при этом не использовать слишком длинные кабельные линии (например, более 20–50 м для импульсов с фронтом 2–3 нс, причем предельная длина зависит от типа кабеля и его диаметра), так как при большей длине расплывание фронта и затухание импульса начинают вносить заметную ошибку [9] для наносекундных импульсов, и, в-третьих, необходимо точно учитывать долю энергии, которая вкладывается в реактивную составляющую.

Токи падающего и отраженного импульсов в коаксиальном кабеле удобнее всего измерять с помощью шунта обратного тока (ШОТ), который включен в разрыв оплетки кабеля. Размеры ШОТ должны быть много меньше длины, которую занимает фронт импульса в кабеле.

В качестве нелинейной нагрузки мы использовали коаксиальную газоразрядную ячейку, вдоль оси которой размещена газоразрядная трубка (длиной от 0,5 до 1,5 м), окруженная металлическим экраном. Разрядная ячейка была

сконструирована таким образом, чтобы в предположении металлической проводимости плазмы ее волновое сопротивление равнялось волновому сопротивлению кабельной линии. Тем не менее для любой конструкции возможны погрешности в измерении энерговклада за счет потери части электромагнитной энергии при излучении в окружающее пространство и токов утечки через монтажные емкости и индуктивности. И часть обратного тока может протекать не по оплетке кабеля, а по заземленным металлоконструкциям. При этом часть энергии может накапливаться в паразитных RC и LC контурах, а затем перераспределяться, частично поглощаясь в нагрузке и частично возвращаясь в передающую линию. Всё это приводит к искажениям отраженного импульса, не связанным с вкладом энергии непосредственно в нагрузку.

Для определения вносимой этими причинами погрешности и для повышения точности измерения энерговклада следует сравнивать отраженные от разрядного промежутка импульсы с отраженными импульсами, когда заведомо нет пробоя и не происходит диссипация энергии в плазме разряда, а потери энергии имеют место только за счет вышеуказанных причин. В качестве такого эталонного импульса мы брали отраженный от разрядной ячейки импульс в отсутствие пробоя (рис. 1), для чего в одном случае разрядная трубка откачивалась до глубокого вакуума (10^{-5} торр), в другом – внутрь трубки вводился точно подогнанный металлический стержень, моделирующий плазму. Таким образом, сравнивая отраженный импульс при возникновении пробоя с эталонным, мы с большей точностью определяли вклад энергии непосредственно в разряд. Для повышения точности измерений и для автоматической обработки экспериментальных данных синхронизацию регистрирующего прибора, в качестве которого мы использовали цифровой осциллограф, производили от падающего импульса. Поскольку длина линии является стабильной величиной, а длительность фронта падающего импульса составляла 1–3 нс, то точность привязки отраженных импульсов к эталонному отраженному импульсу была не менее 0,2 нс.

Эта методика применима для исследования не только импульсного пробоя в газоразрядных трубках, но и любых других нелинейных нагрузок, например искрового и барьерного разрядов. При работе с высокими напряжениями следует учитывать, что в зависимости от конструкции разрядной камеры и подводных линий возможно возникновение неконтролируемых разрядов (коронного и стримерного), а так как условия их возникновения очень зависят от полярности

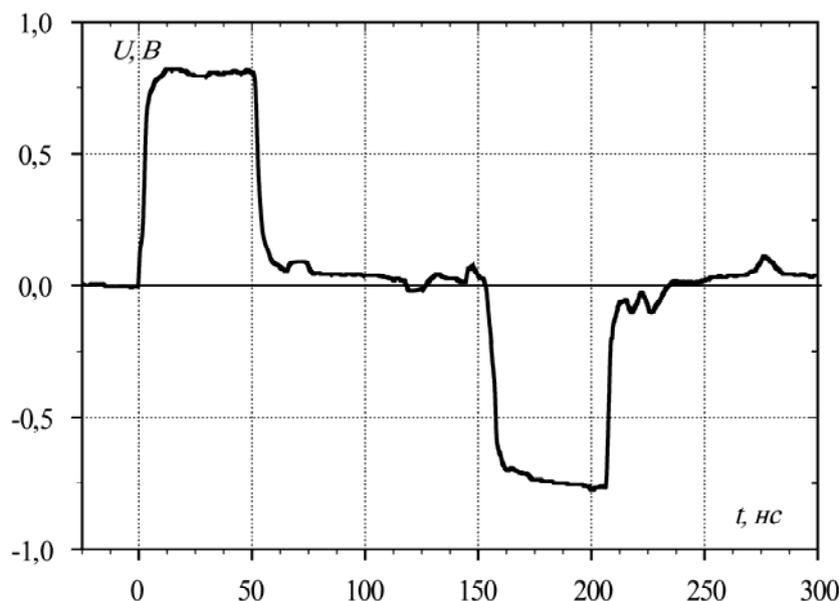


Рис. 1. Типичная оциллограмма с ШОТ падающего (положительная полярность) и отраженного импульсов (отрицательная полярность).

напряжения, то необходимо выполнять калибровку как для положительных, так и для отрицательных полярностей напряжения во всём диапазоне рабочих напряжений.

КОНСТРУКЦИИ И КАЛИБРОВКА ШОТ

Шунт обратного тока представляет собой низкоиндуктивный резистор, который помещен в разрыв оплетки коаксиального кабеля и не изменяет его геометрию. При работе с сигналами, содержащими высокочастотные гармоники, с целью уменьшения индуктивности датчика и увеличения полосы пропускания в качестве ШОТ используют тонкостенный цилиндр, изготовленный из фольги высокоомного материала [10], например титана. Однако при работе с высоковольтными импульсами простого уменьшения индуктивности ШОТ недостаточно. Для пояснения этого рассмотрим конструкции ШОТ, изображенные на рис. 2. При использовании сплошной фольги (рис. 2А) высокочастотные гармоники распространяются по тонкому скин-слою [11]. Так как съём сигнала осуществляется с внешней поверхности фольги, а магнитное поле не успевает проникнуть на достаточную глубину в ее толщину, чтобы обеспечить протекание тока по внешней поверхности, то такой шунт, срезая высокочастотные гармоники, будет неверно отображать короткий фронт импульса.

Для коаксиального трубчатого шунта время нарастания сигнала определяется диффузией магнитного поля через его стенку [12]:

$$t_r = 0,237\mu_0 d^2 / \rho, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость; d – толщина стенки шунта; ρ – удельное сопротивление мате-

риала шунта. Это время определяет минимально разрешимую длительность фронта ШОТ из фольги [13]. Из (1) видно, что чем толще стенка шунта, тем ниже временные характеристики, но, с другой стороны, чем тоньше его стенка, тем меньшие токи можно измерять с помощью ШОТ из-за нагрева фольги. В случае нагрева шунта во время импульса его сопротивление меняется, в результате чего меняется характеристика ШОТ. Это особенно важно учитывать при измерении на высоких частотах следования импульсов или больших величинах импульсных токов (> 10 кА), поскольку стенки шунта в этом случае должны быть толстыми, чтобы уменьшить его нагрев. Характеристики ШОТ из толстой фольги можно улучшить, прорезав в последней отверстия (рис. 2В) [14], что позволяет увеличить рабочую полосу частот более чем в три раза и измерять импульс с амплитудой 25 кВ в линии с волновым сопротивлением 75 Ом с разрешением 0,5 нс, в то время как применение шунта из сплошной титановой фольги не позволяет достигнуть разрешения сигнала более чем 1,5 нс. Наличие отверстий не устраняло проблему перегрева ШОТ при высокой частоте следования импульсов.

Для решения задачи обеспечения достаточной полосы пропускания и возможности работы на частотах 1,2 кГц без перегрева мы изготовили шунт обратного тока из параллельно соединенных низкоиндуктивных объемных резисторов ТВО-0,125 Вт-3 Ом (рис. 3). Такая конструкция шунта проста в изготовлении и обеспечивает временное разрешение ~ 1 нс. Промежутки между сопротивлениями способствуют проникновению магнитного поля и тока на внешнюю поверхность шунта, что дает возможность измерять

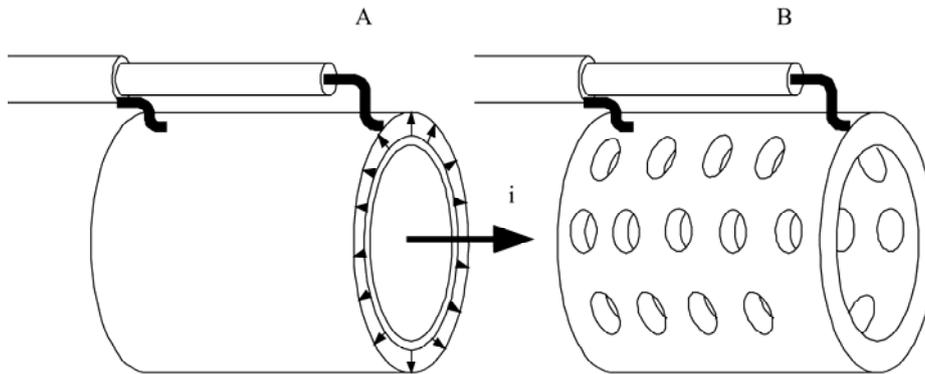


Рис. 2. ШОТ из сплошной фольги в виде цилиндра, диаметр которого равен диаметру оплетки силового кабеля (не показан) (А). Показаны подключение измерительного кабеля к внешней поверхности шунта и распространение импульсного тока от внутренней поверхности к внешней. ШОТ с отверстиями в фольге для улучшения частотной характеристики в области высоких частот (В).

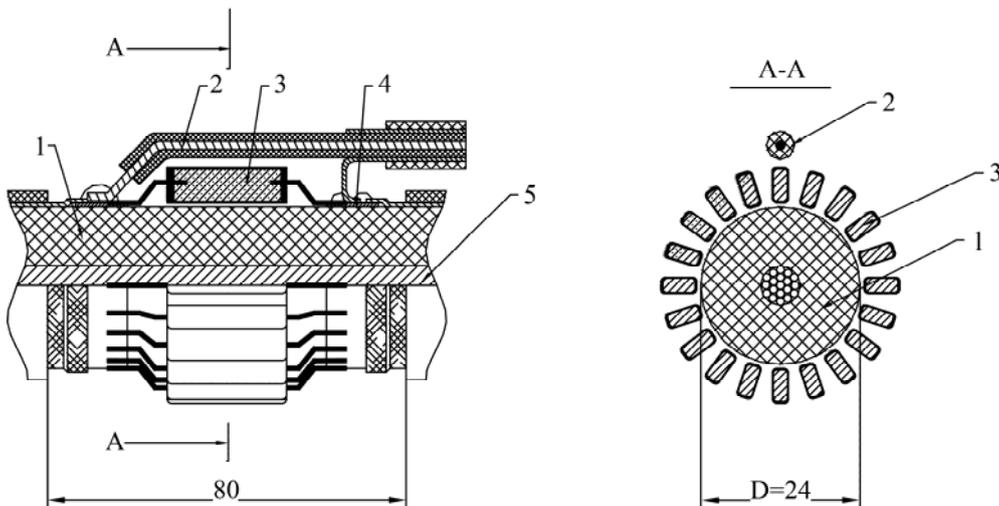


Рис. 3. ШОТ: слева – продольное сечение; справа – поперечное сечение. 1 – коаксиальный кабель; 2 – кабель, идущий к осциллографу; 3 – низкоиндуктивные резисторы; 4 – медная фольга; 5 – центральная жила кабеля.

большие токи без искажений сигнала. Симметрично расположенное большое количество (не менее 10) низкоиндуктивных резисторов позволяет свести влияние индуктивности к минимуму, и при этом не ухудшаются условия для протекания высокочастотных гармоник тока. ШОТ должен иметь линейный размер много меньше длины фронта импульса в кабеле. В таком случае шунт является точечной нагрузкой и не искажает сигнал.

Коэффициент деления такого ШОТ можно рассчитать, но мы рекомендуем выполнять калибровку, так как при работе с высоким напряжением и с очень быстро протекающими процессами возникает множество побочных явлений, которые не поддаются расчету. Реальное сопротивление ШОТ зависит от качества его изготовления и типа выбранных резисторов. Поэтому для проведения корректных измерений необходима калибровка временных и амплитудных характеристик шунта. В настоящей работе для калибровки мы использовали генератор импульсов на отрезках кабелей (рис. 4).

Кабель 6, в разрыве оплетки которого был размещен калибруемый ШОТ, заряжался до напряжения U_0 . С помощью разрядника высокого давления РГЛ-2 один конец кабеля заземлялся. После коммутации по кабелю распространяется волна напряжения с амплитудой U_0 , фронт волны определяется временем коммутации разрядника, которое при давлениях в разряднике более 2 атм существенно меньше 1 нс и достигает 0,1–0,2 нс при давлении в разряднике 10 атм. Ток в волне $I = U_0/Z$. Длительность импульса определяется электрической длиной линии, которая определяется временем прохождения по линии фронта импульса, электрическая длина коаксиальных кабелей с изоляцией из полиэтилена длиной один метр равна ~ 5 нс. Электрическую длину линии следует выбирать больше 20–100 нс, чтобы на измерения амплитуды не влияли переходные процессы в коммутаторе. Для повышения точности калибровка шунта должна проводиться при нескольких разных значениях зарядного напряжения, перекрывающих весь рабочий диапазон. Это необходимо для про-

верки линейности ШОТ. Отклонение выходного сигнала от линейной зависимости чаще всего указывает на некачественную сборку ШОТ или на плохую изоляцию, в результате чего на ШОТ возникает коронный разряд. В описываемом далее эксперименте мы проводили калибровку в диапазоне 5–50 кВ (рис. 5).

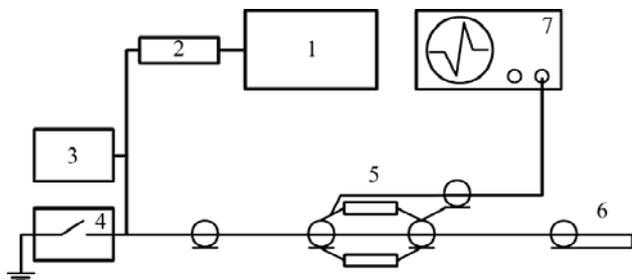


Рис. 4. Схема калибровки ШОТ: 1 – высоковольтный источник; 2 – зарядный резистор $R = 200 \text{ МОм}$; 3 – киловольтметр С-196; 4 – разрядник РГЛ-2; 5 – шунт обратного тока; 6 – кабель РК-50-24-17; 7 – осциллограф Tektronix TDS-640 А.

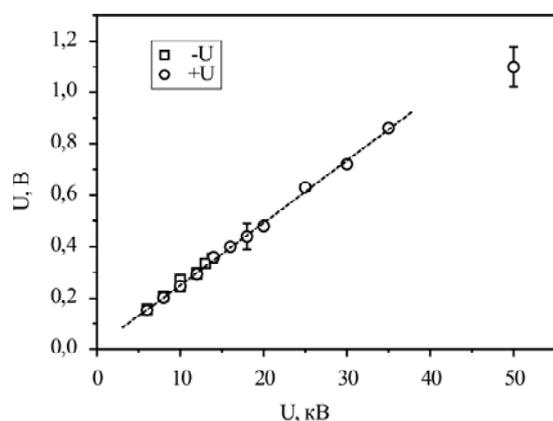


Рис. 5. Калибровочная кривая ШОТ.

Следует время от времени повторять калибровку, так как через шунт проходят большие токи ($100 \text{ А} \div 1 \text{ кА}$), поэтому возможно изменение характеристик его работы из-за выгорания резисторов в месте контакта электрических вводов и графитовой массы.

Для устранения электромагнитных помех измерительная аппаратура была помещена в экранированную комнату, на входе в которую стояли ВЧ фильтры на линиях сетевого питания, измерительные кабели были проложены в экранированных каналах. Помехи, возникающие вблизи области соединения измерительного кабеля с ШОТ, хорошо устраняются навивкой измерительного кабеля на ферритовое кольцо, количество витков вокруг кольца подбирается экспериментально.

ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОВКЛАДА В ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ

Импульсный электрический разряд создавался в цилиндрической газоразрядной трубке, окруженной металлическим экраном для созда-

ния коаксиальной геометрии, похожей на продолжение коаксиального кабеля. Высоковольтный электрод газоразрядной трубки соединялся с центральной жилой кабеля, а низковольтный был короткозамкнут на внешний экран, который соединялся с оплеткой кабеля с обеспечением максимальной согласованности волновых сопротивлений. Отношение диаметров экрана и внутреннего диаметра разрядной трубки выбиралось таким образом, чтобы в приближении металлической проводимости плазмы волновое сопротивление разрядной ячейки равнялось 50 Ом . В разрыв оплетки высоковольтного кабеля устанавливается шунт обратного тока, сигнал с которого регистрировался с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS-640 А. Высоковольтные импульсы с напряжением $U = 20\text{--}30 \text{ кВ}$ как отрицательной, так и положительной полярности длительностью $50 \pm 5 \text{ нс}$ от генератора импульсов с частотой $1,2 \text{ кГц}$ подавались по коаксиальному кабелю РК-50-24 с волновым сопротивлением 50 Ом на высоковольтный электрод газоразрядной трубки.

После калибровки ШОТ, перед началом исследований необходимо выполнить описанные выше измерения отраженных сигналов без разряда для определения опорного импульса с учетом возможной неконтролируемой диссипации энергии в разрядной ячейке. Такая схема повышает точность измерений, но требует синхронизации импульсов. Синхронизация и учет возможных потерь при передаче высоковольтного импульса по линии производились двумя способами, причем в каждом энерговыклад в газоразрядном объеме трубки был заведомо равен нулю. Первый способ – в разрядной трубке создается глубокий вакуум, второй – внутрь трубки вводится металлический стержень, максимально точно подогнанный под её внутренний диаметр (вместо стержня трубку можно заполнить хорошо проводящей жидкостью, например, металлической ртутью [15]). В этом случае импульс должен пройти через разрядную ячейку без отражений. При этом к низковольтному электроду необходимо присоединить кабельную линию с согласованной нагрузкой, сопротивление которой равно импедансу кабеля (50 Ом).

Для проверки точности измерений энерговыклада предлагаемой методикой мы сравнили их с измерениями калориметрическим методом, определив нагрев диэлектрика, заполняющего разрядную ячейку. Диэлектрическим наполнителем разрядной ячейки служила вода. Измеряя начальную и конечную температуру воды, определяли энергию, выделившуюся в разрядной ячейке. Применяемая калориметрическая методика была проверена и откалибрована при

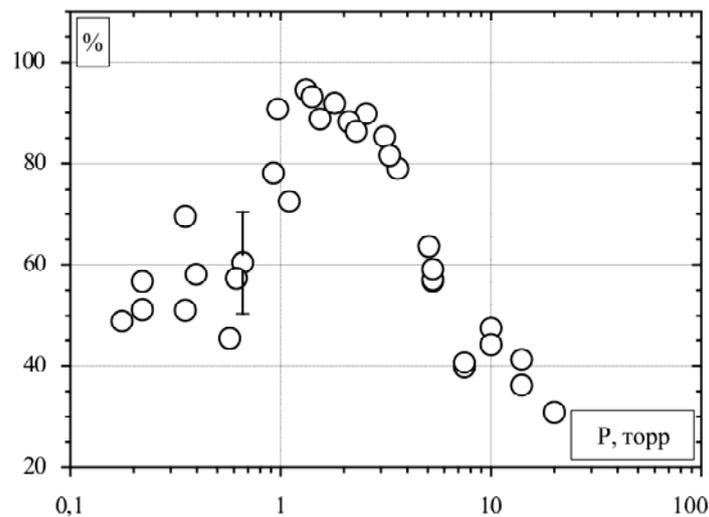


Рис. 6. Доля энергии падающего импульса (350 мДж), вложенная в разряд при разных давлениях. Отрицательная полярность. Газоразрядная трубка, внутренний диаметр 10 мм. Наполнение – СО.

использовании в качестве модельной нагрузки стационарного тлеющего разряда. Разрядная трубка, которая представляла собой нелинейную нагрузку, была окружена заземленным металлическим экраном. Конструкция газоразрядной трубки позволяла зажигать как тлеющий, так и импульсно-периодический разряд. Для тлеющего разряда мы измеряли разрядный ток, напряжение на разрядной трубке, температуру стенки разрядной трубки и температуру экрана.

Решение задачи передачи тепла от разрядной трубки в окружающее пространство для коаксиальной геометрии не составляет труда. Даже в случае газового наполнения (воздух) произведение чисел Грасгофа и Прандтля $< 10^3$, следовательно, для расчета теплопередачи от трубки к экрану можно пользоваться законом Фика. Теплопередача от экрана в окружающее пространство рассчитывалась по эмпирическим формулам [16]. Эксперименты с тлеющим разрядом и расчеты температуры экрана в зависимости от выделяемой мощности в разрядной трубке показали отличный результат. Убедившись в корректности калориметрического способа, мы проверили точность измерения энерговклада с помощью ШОТ. Для этого в импульсно-периодическом разряде с помощью ШОТ по вышеописанной методике измерялись вкладываемая энергия и нагрев диэлектрика, заполняющего пространство между разрядной трубкой и экраном разрядной ячейки. По измеренной температуре диэлектрика вычислялась мощность, поглощенная в разрядной трубке. Затем, зная частоту и энерговклад за один импульс (рис. 6), мы определяли ту же величину по измерениям ШОТ.

Сравнение этих двух величин показало удовлетворительный результат, отличие не превышало 5%. Данная методика применялась нами при исследованиях разрядов различного типа:

барьерного, искрового, импульсно-периодического в виде высокоскоростной волны ионизации [17]. Предел измерений с помощью ШОТ описанной конструкции составляет 300 Вт средней мощности, а по пиковой мощности – до нескольких мегаватт.

ВЫВОДЫ

Разработан бесконтактный метод измерения диссипации энергии в электрических разрядах на базе шунта обратного тока при работе с высоковольтными импульсами напряжения (5–50 кВ) наносекундной длительности (5–100 нс) и средней мощностью до 300 Вт.

Проанализированы различные источники погрешностей.

Описаны методы калибровки, позволяющие аккуратно разделить вклад энергии в активную и реактивную нагрузки.

Выполнена экспериментальная проверка, доказавшая высокую надежность предлагаемой конструкции шунта обратного тока и методики измерения энерговклада.

Предлагаемая методика согласуется с калориметрическими измерениями с погрешностью не более 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое. *УФН*. 1994, **164**(3), 263–286.
2. Aref'ev A.S., Maloletkov B.D. and Yudaev Yu.A. Ionization Waves Used to Increase the Speed of Hydrogen Thyratrons. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 1994, (3), 50–53.
3. Starikovskaia S.M., Kosarev I.N., Krasnochub A.V., Mintousov E.I., Starikovskii A.Yu. Control of Combustion and Ignition of Hydrocarbon-containing Mixtures by Nanosecond Pulsed Discharges. *43-rd*

- AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005. Reno, Nevada, USA, paper AIAA 2005-1195.
4. Василяк Л.М., Костюченко С.В. Красночуб А.В., Кузьменко М.Е. Возбуждение уровня 6^3P_1 атома ртути при накачке смеси паров ртути и аргона импульсно-периодическим наносекундным разрядом. *Письма в ЖТФ*. 1998, **24**(5), 89.
 5. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Потери энергии при электрическом импульсном пробое водоцементных смесей. *Электронная обработка материалов*. 2004, **40**(2), 47–49.
 6. Курец В.И., Филатов Г.П., Жучков А.И., Юшков А.Ю. Расчет потерь энергии при пробое проводящих сред. *Электронная обработка материалов*. 2003, **39**(6), 37–43.
 7. Beyer M., Boeck W., Möller K., Zaengl W. Hochspannungstechnik. Theoretische und Praktische Grundlagen. *Springer-Verlag*, 1986. 362 p.
 8. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи*. М.: Высшая школа, 1978. 524 с.
 9. Глебович Г.В., Ковалев И.П. *Широкополосные линии передачи импульсных сигналов*. М.: Сов. радио, 1973. 224 с.
 10. Thornton E. A Metal-foil Shunt for Measuring Sub-microsecond Duration High Current Pulses. *J.Phys .E: Scientific Instruments*. 1970, **3**, 862.
 11. Ельчанинов А.С., Ковальчук Б.М., Лавринович В.А. Шунт из фольги для регистрации наносекундных импульсов. *ПТЭ*. 1975, (2), 126–128.
 12. Schwab A.J. *Hochspannungs Messtechnik Messgerate und Messverfahren*. *Springer-Verlag*, 1981. 264 p.
 13. Thornton E. Subnanosecond Risetime in Metal Foil Coaxial Shunts. *J. Phys. E: Sci. Instrum*. 1975, **8**, 1052.
 14. Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В., Самойлов И.С. Делитель напряжения. SU 1058013 А, 1982.
 15. Loeb L.B. Ionizing Waves of Potential Gradient. *Science*. 1965, **148**, 1417–1426.
 16. Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1977. 334 с.
 17. Krasnochub A.V., Vasilyak L.M. Dependence of the Energy Deposition of a Fast Ionization Wave on the Impedance of a Discharge Gap. *Journal Physics D: Applied Physics*. 2001, **34**, 1678–1682.

Поступила 26.06.12

После доработки 22.11.12

Summary

The method for measuring the energy absorbed in the non-linear load with the help of the return current shunt is proposed. The design and utilization features of the return current shunt have been considered for the case of high-voltage (10–100 kV) nanosecond pulses. Experimental results are given on utilizing the proposed method to study the energy absorption under a high-voltage pulse discharge in a gas.

Keywords: current shunt, nanosecond resolution, measurement of absorbed energy, high voltage pulses, nanosecond-pulse electrical discharge.