

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КОНСТРУКЦИИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. Селезнев, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ осуществляется разработка экспериментального образца субнаносекундного ускорителя электронов на базе малогабаритного ускорителя АРСА [1] с газонаполненным формирователем. Длительность субнаносекундного импульса не должна превышать 0,3 нс при максимальной энергии электронов 800 кэВ.

Для того чтобы получить подобные временные параметры импульса, применяются обостряющие и срезающие разрядники. При этом, чтобы обеспечить малые времена переходных процессов и уменьшить длительность импульса, разрядники должны обладать минимальной индуктивностью.

Цель работы – расчет индуктивности срезающего разрядника и выбор конструкции разрядника, позволяющей уменьшить его индуктивность.

Актуальность работы заключается в том, что в предлагаемой конструкции формирователя электроды разрядников имеют сложную форму и малую индуктивность (единицы нГн), которую нельзя измерить или рассчитать, используя аналитические формулы [2, 3]. Ниже приводятся некоторые способы решения данной проблемы.

1. Устройство и принцип работы формирователя субнаносекундных импульсов напряжения

На рис. 1 схематично представлена конструкция формирователя субнаносекундных импульсов напряжения. Его работа заключается в следующем. На формирующую линию 1 с генератора Аркадьева-Маркса поступает импульс напряжения с длительностью фронта $\tau < 10$ нс. При срабатывании разрядника 2 происходит зарядка короткой формирующей линии 5 от линии 1 за время, меньшее 1 нс. Катушка индуктивности 4 при этом служит для зарядки межэлектродной емкости разрядника 2. После зарядки короткой линии 5 срабатывает разрядник 6, и линия 5 разряжается на передающую линию 7. При этом в линии 7 формируется импульс напряжения с субнаносекундным фронтом и длительностью, которая определяется двойным пробегом волны разрядки по короткой линии 5 и равна 0,3 нс. Дополнительное сокращение длительности импульса осуществляется при помощи срезающего разрядника 8, который срабатывает на вершине субнаносекундного импульса и уменьшает длительность его среза (спада).

Срезающий разрядник состоит из выдвижного электрода 9 и участка внутреннего электрода 10 пе-

редающей линии 7. Передающая линия подключена к ускорительной трубке 11. Внутренние детали трубки сконструированы как проводники линии с распределенными параметрами, что позволяет предельно снизить искажения поступающего на трубку субнаносекундного импульса.

Эффективность работы срезающего разрядника сильно зависит от суммарной индуктивности искрового пробоя и электродов разрядника [4]. Увеличение индуктивности элементов срезающего разрядника приводит к увеличению длительности импульса и паразитным колебаниям. Поэтому на этапе разработки конструкции разрядника необходимо определять его индуктивность и принимать меры для ее снижения.

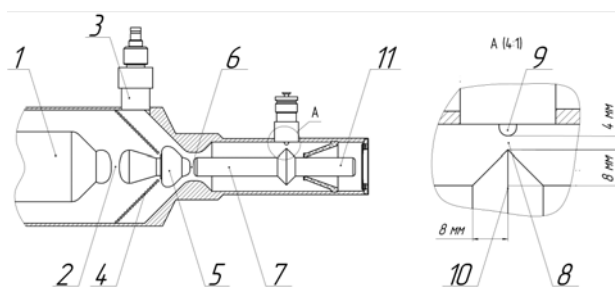


Рис. 1. Конструкция формирующего устройства: 1 – формирующая линия; 2, 6 – обостряющие разрядники; 3 – наносекундный делитель напряжения; 4 – катушка индуктивности; 5 – короткая формирующая линия; 7 – передающая линия; 8 – межэлектродный зазор срезающего разрядника; 9 – выдвижной электрод срезающего разрядника; 10 – участок внутреннего электрода передающей линии; 11 – ускорительная трубка

2. Способы определения индуктивности

Для решения поставленной задачи были предложены следующие способы:

1) Проведение расчета, используя аналитические формулы. Для этого необходимо: разбить поверхностный ток в электродах разрядника на элементарные нити тока, просуммировать собственные и взаимные индуктивности для каждой нити тока, используя аналитические формулы, и найти значение общей индуктивности. Вычисления осложнены расчетом взаимных индуктивностей нитей тока из-за наличия несимметричных элементов.

2) Проведение расчета, используя теорию четырехполюсников. Для этого:

- представить разрядник в виде четырехполосника с эквивалентной схемой;
- в программе моделирования физических процессов смоделировать прохождение импульсов тока и напряжения через разрядник;
- разложить в ряды Фурье эти импульсы и провести их спектральный анализ;
- решить уравнения четырехполосника и определить его индуктивность для каждого значения частоты.

Трудности заключаются в составлении эквивалентной схемы замещения, в которой бы исключалась магнитная связь между индуктивными элементами.

3) Проведение расчета в программе моделирования физических процессов. Для этого в магнито-статическом режиме рассчитать индуктивности электродов разрядника по выделившейся электромагнитной энергии W при прохождении по ним тока величиной I по формуле (1):

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (1)$$

4) Проведение расчета, измеряя индуктивности макетов электродов больших размеров. Для этого:

- изготовить макеты электродов разрядника в масштабе, значительно большем единицы (5:1, 10:1 и т. д.);
- измерить их индуктивности и определить зависимость от масштаба;
- определить искомую индуктивность при масштабе, равном единице.

Для расчетов был выбран третий способ, как наиболее простой.

3. Расчеты в программе моделирования физических процессов

3.1. Построение расчетных моделей

Индуктивность срезающего разрядника рассчитывалась как сумма индуктивностей участка внутреннего электрода передающей линии 7 (рис. 1) и выдвижного электрода срезающего разрядника с каналом искрового пробоя.

Модель выдвижного электрода срезающего разрядника с каналом искрового пробоя представлена на рис. 2. Она построена по сочетанию выдвижного электрода длиной $l_{эл}$ и последовательно соединенного с ним канала искрового разряда длиной $l_{разр}$.

Искровой пробой моделировался в виде сплошного цилиндрического проводника диаметром 1 мм. Длина разряда $l_{разр} = 4$ мм обусловлена требованием величины напряжения пробоя азотного промежутка 800 кВ при его давлении 40 атм. Выдвижной электрод также выполнен сплошным, его диаметр равен 4 мм.

Имитация подачи тока осуществлялась при помощи токового порта, подающего постоянный ток величиной 1 А через торцевую поверхность сечения проводников модели.

С целью снижения индуктивности срезающего разрядника было предложено выполнить участок 10 (рис. 1) в виде двух усеченных конусов. Для расчета

индуктивности этого участка построена расчетная модель (рис. 3) половины биконического электрода, которая участвует в процессе среза импульса.

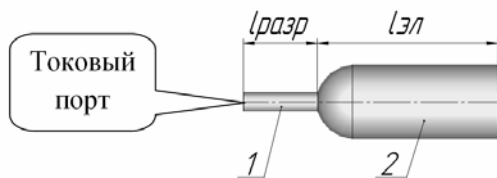


Рис. 2. Модель выдвижного срезающего разрядника с каналом искрового пробоя: 1 – канал искрового пробоя; 2 – выдвижной электрод

Построение расчетной модели проводилось для импульсов длительностью не более 0,3 нс, что соответствует частоте порядка нескольких ГГц. Для такой частоты характерно распространение токов в некотором поверхностном слое металлических проводников (скин-слое), толщину которого можно оценить по формуле [5] (2):

$$\Delta = c \sqrt{2 \frac{\epsilon_0}{\omega \mu_m} \rho} \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума, ρ – удельное сопротивление, c – скорость света, μ_m – относительная магнитная проницаемость, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – циклическая частота, f – частота. Для рассматриваемого случая толщина скин-слоя составляет 0,7 мкм.

Для упрощения расчетов предполагалось, что ток распространяется только в скин-слое, равномерно распределяясь по его сечению. Поэтому модель представляет собой тонкую (толщина 50 мкм) проводящую оболочку в виде усеченного конуса с основаниями диаметром 17 мм и $(37 - 2 \cdot l_{эл})$ мм, где $l_{эл}$ – длина выступающей части электрода срезающего разрядника. Длина $l_{эл}$ изменялась в диапазоне от 2 мм до 10 мм с шагом 0,5 мм. Такой диапазон обусловлен конструкцией и принципом работы срезающего разрядника в данных условиях.

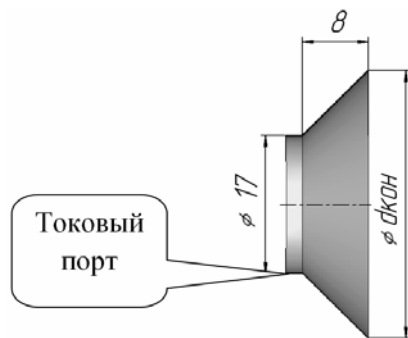


Рис. 3. Модель половины биконического электрода

При длине выдвижного электрода $l_{эл} = 10$ мм биконический электрод в виде усеченного конуса вырождается в цилиндрический.

3.2. Экспериментальная проверка корректности результатов расчета

Для оценки корректности расчетов индуктивностей было сделано следующее:

1) в программе моделирования физических процессов построена расчетная модель биконического электрода, которая представляет собой медную оболочку толщиной 50 мкм (рис. 4). Размеры оболочки были выбраны таким образом, чтобы ее индуктивность была достаточной для измерения приборами. Согласно расчету, она составляет;

2) из медной фольги толщиной 50 мкм по размерам модели был изготовлен макет;

3) произведен замер индуктивности макета на измерителе иммитанса МНИПИ Е7-20 (диапазон измерения индуктивности $10^{-11} - 10^4$ Гн, базовая погрешность $\pm 0,1\%$). Подключение макета осуществлялось через подводящие провода. Индуктивность макета не превышает десятков нГн, поэтому при ее измерении необходимо учитывать индуктивность подводящих проводов. В этом случае индуктивность макета определяется как разность суммарной индуктивности и индуктивностей подводящих проводов;

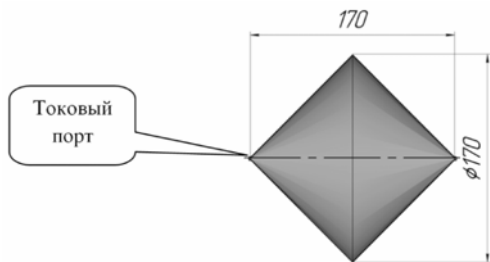


Рис. 4. Расчетная модель конусной оболочки

Индуктивность подводящих проводов зависит от их взаимного расположения, поэтому при ее измерениях макет конусной оболочки заменялся на медный проводник длиной $l = 160$ мм и диаметром $d = 0,9$ мм, индуктивность которого рассчитывается по формуле:

$$L = 2 \cdot l \cdot \left(\frac{\ln(4 \cdot l)}{d} - 1 \right) \quad (3)$$

и равна 178 нГн. Измеренное значение суммарной индуктивности проводника равно 230 нГн. Тогда индуктивность подводящих проводов будет равна:

$$L_{\text{пров}} = 230 - 178 = 52 \text{ нГн}$$

Далее была замерена суммарная индуктивность модели конусной оболочки с подводящими проводами, ее значение равно 93 нГн. Тогда индуктивность $L_{\text{к.о.}}$ модели равна:

$$L_{\text{к.о.}} = 93 - L_{\text{пров}} = 41 \text{ нГн}$$

При расчетах индуктивности конусной оболочки в программе моделирования физических процессов было получено значение $L_{\text{к.о.}}^{\text{теор}} \approx 48,1$ нГн.

4) сравнение $L_{\text{к.о.}}$ и $L_{\text{к.о.}}^{\text{теор}}$ показало, что они отличаются друг от друга не более чем на 15%. Это демонстрируют хорошее соответствие экспериментальных результатов с расчетами, проводимых в программе моделирования физических процессов.

3.3. Результаты расчетов

В расчетах вычислялись значения собственной индуктивности элементов срезающего разрядника в зависимости от длины $l_{\text{эл}}$ выдвижного электрода. При этом диаметр основания конуса внутреннего проводника $d_{\text{кон}}$ зависел от длины $l_{\text{эл}}$ следующим образом:

$$d_{\text{кон}} = 37 - 2 \cdot l_{\text{эл}} \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов суммарной индуктивности выдвижного электрода и канала искрового пробоя в зависимости от длины $l_{\text{эл}}$.

Таблица 1

Результаты расчетов суммарной индуктивности выдвижного электрода и канала искрового пробоя от длины $l_{\text{эл}}$.

$l_{\text{эл}}, \text{ мм}$	Индуктивность, нГн
10,0	13,19
9,5	12,76
9,0	12,35
8,5	11,91
8,0	11,49
7,5	11,06
7,0	10,64
6,5	10,21
6,0	9,79
5,5	9,36
5,0	8,93
4,5	8,51
4,0	8,08
3,5	7,66
3,0	7,23
2,5	6,81
2,0	6,38

Согласно полученным результатам суммарная индуктивность выдвижного электрода и канала искрового пробоя растет по мере увеличения длины $l_{\text{эл}}$.

В табл. 2 приведены результаты расчетов собственной индуктивности половины биконического электрода в зависимости от длины $l_{\text{эл}}$.

Собственная индуктивность половины биконического электрода также растет по мере увеличения длины $l_{\text{эл}}$. Однако скорость нарастания индуктивности половины биконического электрода меньше чем у выдвижного электрода и канала искрового пробоя. Таким образом, основной вклад в индуктивность срезающего разрядника будет вносить выдвижной электрод. Следовательно для достижения минимально возможной индуктивности разрядника необходимо обеспечить минимальную длину выдвижного электрода.

Таблица 2

Результаты расчетов собственной индуктивности половины биконического электрода от длины $l_{эл}$. выдвигного электрода

$l_{эл}$, мм	Собственная индуктивность, нГн
10,0	13,85
9,5	13,81
9,0	13,76
8,5	13,72
8,0	13,68
7,5	13,64
7,0	13,61
6,5	13,57
6,0	13,54
5,5	13,50
5,0	13,54
4,5	13,42
4,0	13,40
3,5	13,36
3,0	13,34
2,5	13,30
2,0	13,28

Индуктивность срезающего разрядника рассчитывалась согласно разделу 3.1. На рис. 5 представлен график зависимости суммарной индуктивности срезающего разрядника от длины выдвигного электрода $l_{эл}$. При длине $l_{эл} = 10$ мм электрод участка IO (рис. 1) внутреннего проводника линии 7 является цилиндрическим, и индуктивность срезающего разрядника равна 18,74 нГн. Когда $l_{эл} < 10$ мм, электрод является биконическим, при этом индуктивность разрядника меньше чем в случае цилиндрического электрода. При длине выдвигного электрода $l_{эл} = 2$ мм значение индуктивности срезающего разрядника равно 11,34 нГн.

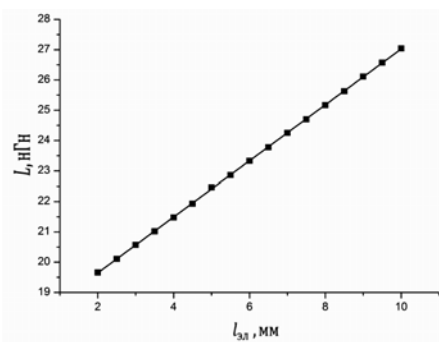


Рис. 5. Зависимость индуктивности срезающего разрядника от длины $l_{эл}$

4. Определение индуктивности электрода с помощью масштабирования

Программа моделирования физических процессов позволяет проводить расчеты только для осесимметричных объектов. Поэтому был рассмотрен

еще один способ определения индуктивности для электродов сложной формы. Анализ аналитических формул для расчета индуктивностей проводников показал, что их индуктивность растет при увеличении их размеров. Было сделано предположение, что индуктивность тел сложной формы также растет с увеличением размеров при сохранении конфигурации. Т. е., вводя коэффициент масштабирования k , который показывает во сколько раз размеры одного проводника больше размеров другого, по известной индуктивности одного из проводников можно рассчитать индуктивность второго.

В этом случае (в случае истинности данного предположения) Чтобы определить индуктивность рабочего электрода, нужно сделать следующее:

- 1) изготовить несколько макетов электрода с разным коэффициентом масштабирования $k > 1$ и провести измерения их индуктивностей;
- 2) определить функцию зависимости индуктивности от коэффициента масштабирования k ;
- 3) рассчитать индуктивность электрода при коэффициенте масштабирования $k = 1$.

В качестве примера построения такой кривой была исследована зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода от его размеров. Для этого в программе моделирования физических процессов проводились расчеты при различных k , значения которого варьировались от 0,2 до 10. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

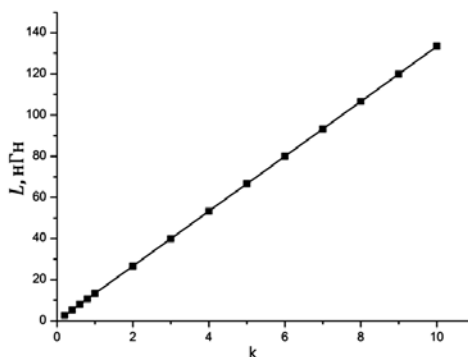


Рис. 6. Зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода при различных значениях коэффициента масштабирования k

На графике отчетливо видна линейная зависимость собственной индуктивности половины биконического электрода от коэффициента масштабирования k . При аппроксимации точек графика методом наименьших квадратов, получена следующая зависимость:

$$L \approx 13,33 \cdot k \text{ [нГн]} \quad (5)$$

Как и предполагалось, индуктивность половины биконического электрода растет при увеличении k .

Таким образом, зная зависимость индуктивности электрода от коэффициента масштабирования, можно определить искомую индуктивность при

$k = 1$. Кроме того, данный способ позволит решить обратную задачу подбора размеров электрода для обеспечения необходимой индуктивности.

Заключение

1. В ходе решения задачи по определению малой индуктивности срезающего разрядника с элементами сложной формы рассмотрены некоторые способы ее решения. Такую индуктивность трудно рассчитать при помощи аналитических формул и нельзя измерить без большой погрешности. Расчет индуктивности проводился в программе моделирования физических процессов по выделившейся электромагнитной энергии W , вызванной током I .

2. Для проведения расчетов построены модели элементов конструкции срезающего разрядника. В результате расчетов получено, что:

– основной вклад в индуктивность срезающего разрядника будет вносить выдвижной электрод, уменьшая длину которого, можно достичь минимального значения индуктивности разрядника;

– при выполнении электрода на внутреннем проводнике передающей линии в виде цилиндра индуктивность разрядника составит 18,74 нГн, а выполнение электрода в виде двух усеченных конусов, соединенных своими основаниями, позволит снизить индуктивность до 11,34 нГн.

3. Проведено измерение индуктивности биконического электрода, для этого из медной фольги изготовлен его макет, увеличенного размера. Результаты

измерений индуктивности отличаются от расчетных значений не более чем на 15 %, что демонстрирует их хорошее соответствие.

4. Рассмотрен способ определения индуктивности электрода с помощью масштабирования. На примере половины биконического электрода построена зависимость значений его индуктивности от коэффициента масштабирования k . Данный метод позволит не только определить искомую индуктивность при $k = 1$, но и решить обратную задачу подбора размеров электрода для обеспечения необходимой индуктивности.

Литература

1. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н., Калиновская Н. И. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений // Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5 С. 229–237.

2. Калантаров П. Л., Цейтлин А. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.

3. Гинкин Г. Г. Справочник по радиотехнике. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1948.

4. Желтов К. А. Пикосекундные сильноточные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

5. Власов А. А. Макроскопическая электродинамика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.