

Методика измерения падения напряжения в области нагрузки на сильноточном генераторе МИГ

А.Г. Русских^{1,}, А.С. Жигалин¹, В.И. Орешкин^{1,2}*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.*

²*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия.*

**russ@ovpe2.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Работа посвящена разработке методики измерения падения напряжения на нагрузке сильноточного генератора МИГ. В ходе решения поставленной задачи нами была проведена апробация различных подходов к решению проблемы измерения напряжения. Амплитудные значения падения напряжения в месте расположения датчика напряжения могут составлять несколько сотен киловольт при фронте его нарастания около 80 нс. Измерения падения напряжения производятся в условиях близко расположенных токоведущих электродов. Наиболее надежной и адекватной схемой, позволяющей произвести измерение падения напряжения на нагрузке, является индуктивный делитель. Описаны параметры и особенности индуктивного делителя напряжения, разработанного и реализованного в ходе выполнения данной задачи.

Ключевые слова: индуктивный делитель напряжения, сильноточные генераторы тока, магнитное поле, самоизоляция электродов магнитным полем.

1. Введение

Измерение падения напряжения $U_{load}(t)$ на нагрузке сильноточных генераторов тока является одной из центральных задач при проведении экспериментов, в которых должны определяться такие переменные во времени параметры как мощность $P_{load}(t)$ и вложенная энергия $W_{load}(t)$. Если задача измерения тока $I_{load}(t)$, протекающего через нагрузку и скорости его изменения $dI_{load}(t)/dt$ решается достаточно просто при помощи поясов Роговского, индуктивных петель или канавок, то проблема измерения падения напряжения в условиях близко расположенных электродов, находящихся под потенциалом сотни киловольт, остаётся достаточно сложной. При использовании традиционного активного высокоомного делителя напряжения, основной сложностью измерения падения напряжения на нагрузке является пробой вакуумного промежутка в области расположения электродов делителя напряжения. Как известно причиной, по которой пробой между высоковольтными электродами не наблюдается при отсутствии локальных неоднородностей, является самоизоляция электродов магнитным полем, возникающим при протекании сильноточного разряда. Электроны, вылетающие из поверхности высоковольтного катода, заворачиваются назад собственным магнитным полем протекающего тока и возникновение пробоя затрудняется. При установке традиционного активного высокоомного делителя напряжения вносится локальная неоднородность магнитного и электрического поля, в которой условие самоизоляции нарушается, следствием чего является возникновение пробоя (см. Рис.1). Одним из способов решения данной задачи, является замена традиционного активного высокоомного делителя напряжения на индуктивный делитель напряжения, в цепи которого протекает достаточно большой ток, для того чтобы выполнялось условие самоизоляции. Такой подход достаточно привлекателен с точки зрения самой возможности измерения падения напряженности магнитного поля, но имеет один очевидный недостаток, а именно потерю части тока генератора. В связи с этим, при разработке конструкции индуктивного делителя напряжения разумно предусмотреть, чтобы индуктивность делителя напряжения была на порядок больше индуктивности нагрузки генератора.

2. Измерение падения напряжения на нагрузке генератора МИГ при помощи высокоомного активного делителя напряжения

Конструкция разработанного индуктивного делителя напряжения совместно с узлом нагрузки предназначенного для взрыва проводников приведена на Рис.2. Пусть в область

расположения делителя напряжения и нагрузки поступает ток $I(t)$. Часть этого тока $I_{dev}(t)$ потечет через индуктивный делитель (участок цепи CD), а вторая (большая) часть $I_{load}(t)$ будет протекать через нагрузку (участок цепи AB):

$$I(t) = I_{dev}(t) + I_{load}(t) \quad (1)$$

то же самое справедливо и для их производных:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{dI_{dev}(t)}{dt} + \frac{dI_{load}(t)}{dt} \quad (2)$$

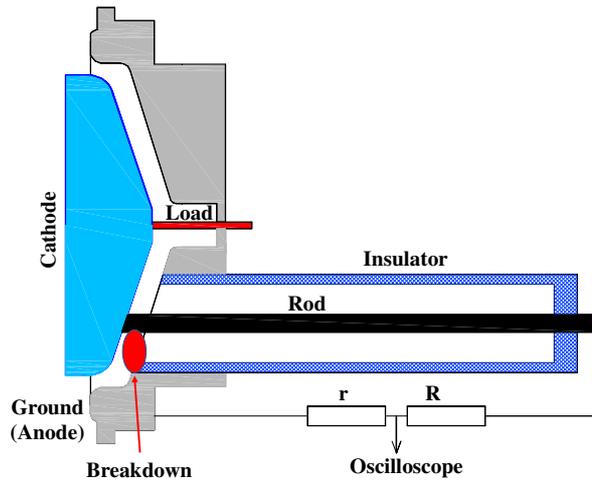


Рис.1 Схема использования традиционного активного высокоомного делителя напряжения.

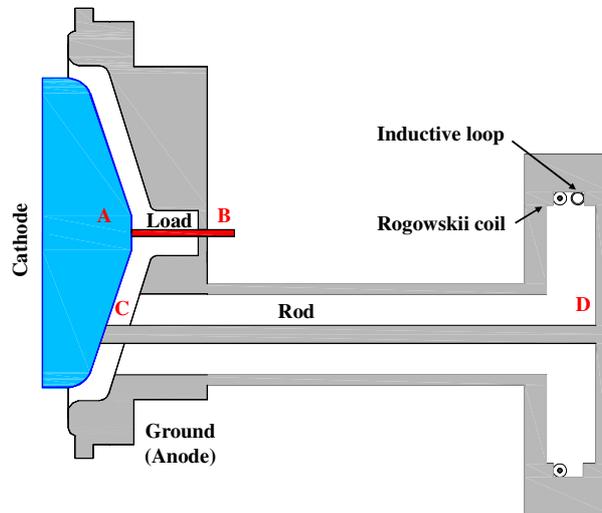


Рис.2 Конструкция индуктивного делителя совместно с узлом нагрузки.

Падение напряжения $U_{dev}(t)$ на высоковольтном конусном электроде генератора МИГ [1] в месте крепления индуктивного делителя напряжения можно вычислить как:

$$U_{dev}(t) = L_{dev} \cdot \frac{dI_{dev}(t)}{dt} \quad (3)$$

С другой стороны, падение напряжения на участке цепи от индуктивного делителя через нагрузку (участок цепи CB):

$$U_{\text{dev}}(t) = U_{\text{con}}(t) + U_{\text{load}}(t) = L_{\text{con}} \cdot \frac{dI_{\text{load}}(t)}{dt} + \frac{d(L_{\text{load}}(t) \cdot I_{\text{load}}(t))}{dt} + I_{\text{load}}(t) \cdot R_{\text{load}}(t), \quad (4)$$

где $L_{\text{con}} = \text{const}$ – это индуктивность конуса, разделяющего делитель и нагрузку, $L_{\text{dev}} = \text{Const}$ – это индуктивность цепи индуктивного делителя, $L_{\text{load}}(t)$ — это индуктивность нагрузки в виде взрываеваемого проводника или закоротки, $R_{\text{load}}(t)$ — это сопротивление нагрузки (взрываеваемого проводника). В случае короткозамкнутой нагрузки, $L_{\text{load}}(t) = \text{const}$ — это индуктивность короткозамкнутой нагрузки, которую можно посчитать исходя из геометрии нагрузки, а сопротивление нагрузки $R(t) = \text{const} = 0$. Выражая $U_{\text{load}}(t)$ из (3) и (4), получаем:

$$U_{\text{load}}(t) = U_{\text{dev}}(t) - U_{\text{con}}(t) = L_{\text{dev}} \cdot \frac{dI_{\text{dev}}(t)}{dt} - L_{\text{con}} \cdot \frac{dI_{\text{load}}(t)}{dt}, \quad (5)$$

Из уравнения (4) можно вычислить и величину сопротивления взрываеваемого проводника как функцию времени:

$$R_{\text{load}}(t) = \frac{1}{I_{\text{load}}(t)} \cdot \left(U_{\text{dev}}(t) - L_{\text{con}} \cdot \frac{dI_{\text{load}}(t)}{dt} - \frac{d(L_{\text{load}}(t) \cdot I_{\text{load}}(t))}{dt} \right), \quad (6)$$

Однако, как следует из выражения (6), для вычисления сопротивления нагрузки $R_{\text{load}}(t)$ необходимо определить временную зависимость $dL_{\text{load}}(t)/dt$, что возможно сделать только из дополнительных наблюдений за геометрическими параметрами нагрузки (например, на основе оптических наблюдений).

Как видно из уравнения (5), для определения падения напряжения на нагрузке необходимо знать индуктивность индуктивного делителя, иметь калиброванные индуктивные петли в области нагрузки и в цепи индуктивного делителя, а калибровку этих петель лучше проверять при помощи поясов Роговского. На генераторе МИГ имеется набор индуктивных калиброванных петель в обратном токопроводе на диаметре 468 мм и 719 мм, при помощи которых измеряется величина производной общего тока $dI(t)/dt$. Исходя из геометрических размеров конструкции, индуктивность цепи индуктивного делителя составляет $L_{\text{dev}} = 77.6$ нГн, в то время как индуктивность конусной части высоковольтного электрода, разделяющего индуктивный делитель и нагрузку, составляет $L_{\text{con}} = 1.6$ нГн. В цепи индуктивного делителя напряжения и непосредственно на выходе нагрузки (со стороны заземленного электрода) также предусмотрены индуктивная петля и пояс Роговского которые измеряют производные тока в данных цепях.

Для оценки систематической погрешности измерений удобно воспользоваться сравнением измеренной и вычисленной величины индуктивности нагрузки при условии постоянства её индуктивности и при условии равенства сопротивления $R_{\text{load}}(t)$ нулю. Интегрируя уравнение (4), можно записать:

$$L_{\text{load}} = \frac{\int U_{\text{dev}}(t) \cdot dt - L_{\text{con}} \cdot I_{\text{load}}(t)}{I_{\text{load}}(t)} = \frac{\int U_{\text{dev}}(t) \cdot dt}{I_{\text{load}}(t)} - L_{\text{con}} \quad (7)$$

При использовании в качестве нагрузки медных трубок с внешним диаметром 3 мм и толщиной стенки 0.5 мм обеспечивается качественный контакт на катоде, при этом нагрузка не успевает поменять свои геометрические размеры и её сопротивление достаточно мало. На Рис.3 приведены осциллограммы тока в цепи нагрузки, тока в цепи делителя напряжения, их производные и осциллограмма напряжения, полученные при использовании в качестве нагрузки медных трубок с внешним диаметром 3 мм, а также кривая индуктивности L_{load} вычисленная в соответствии с уравнением (7) из осциллограмм и оценённая исходя из геометрии нагрузки.

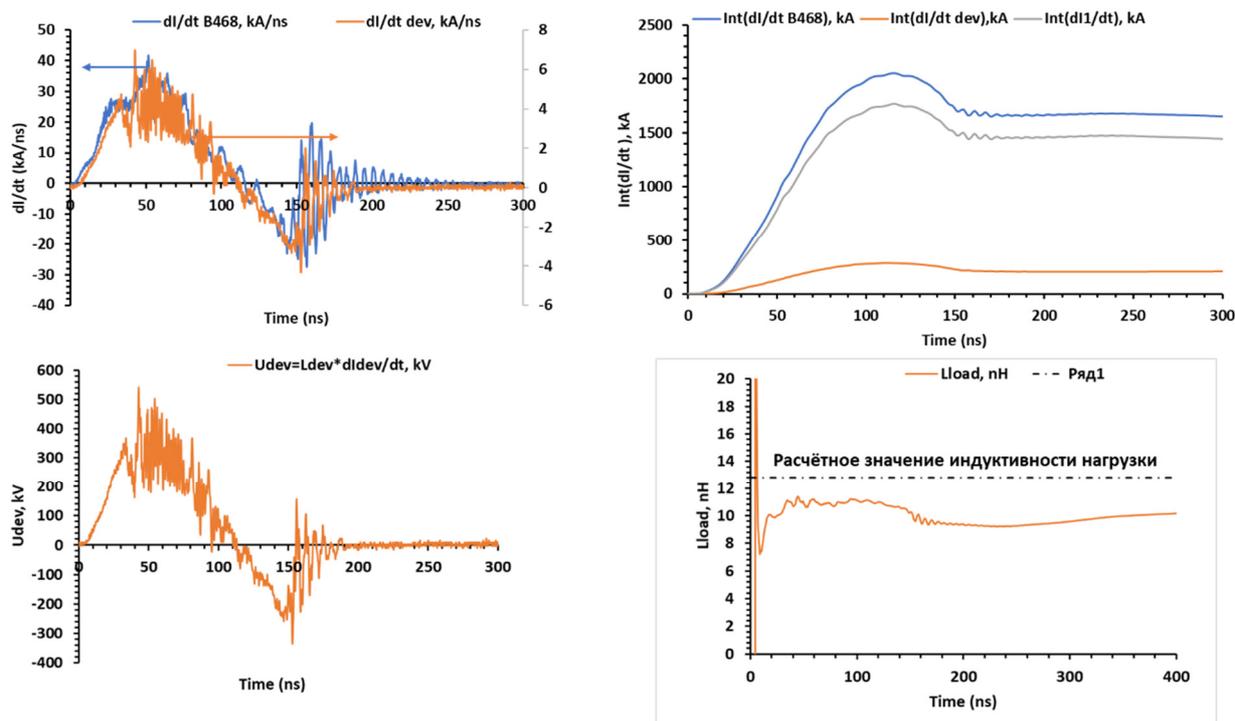


Рис.3. Осциллограммы тока в цепи нагрузки, тока в цепи делителя напряжения, их производные, осциллограмма напряжения полученные при использовании в качестве нагрузки медных трубок с внешним диаметром 3 мм, а также кривая индуктивности L_{load} вычисленная из осциллограмм и оценённая исходя из геометрии нагрузки.

3. Заключение

Измеряемая индуктивность близка к оценочной (расхождение составляет примерно 3 нГн или около 20%). Расхождение в значениях экспериментально и теоретически полученных оценок L_{load} , по-видимому, обусловлено совокупностью систематических ошибок в определении электрофизических характеристик измерительной диагностики и ошибки вычисления индуктивности исходя из геометрических размеров коаксиальных электродов нагрузки. В целом, данная методика измерения падения напряжения на нагрузке сильноточного генератора тока МИГ подтвердила свою перспективность и адекватность.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 20-19-00364).

4. Список литературы

- [1] Климов А.И., *Экспериментальные методы в сильноточной электронике*. (Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013).
- [2] Petin V.K., Shljakhtun S.V., Oreshkin V.I., Ratakhin N.A., *Tech. Phys.* **53**, 776, 2008; doi: 10.1134/S1063784208060170.