

**С.Е.ДОНЕЦ**, Институт электрофизики и радиационных технологий  
НАН Украины, Николаев;

**В.В.ЛЕДЕНЕВ**, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ», Харьков;

**В.В.ЛИТВИНЕНКО**, докт. техн. наук, Институт электрофизики и  
радиационных технологий НАН Украины, Николаев

## **СТЕРЖНЕВОЙ ШУНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЬНЫХ ТОКОВ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Розроблено коаксіальний стрижневий шунт для вимірювання імпульсних струмів у електрофізичних установках. Шунт дозволяє вимірювати струми амплітудою до 75 кА та фронтом до 0,6 мкс. Чутливість шунта – 350 мВ/кА. Розрахунки передатних властивостей шунта добре збігаються з результатами експерименту.

The coaxial bar shunt for measuring of pulse currents in electrophysical plants is developed. The shunt allows to measure currents with amplitude up to 75 kA and front up to 0,6  $\mu$ s. Sensitivity of the shunt is 350 mV/kA. Calculated transfer characteristic of the shunt is in a good agreement with experimental data.

### **Введение**

Низкоомные резистивные шунты используются для измерения быстро меняющихся токов в высоковольтных технологических и испытательных установках для определения пиковых значений и формы импульсов. Эти резисторы обычно имеют сопротивление в диапазоне от 0,1 до 100 МОм, в зависимости от величины тока и значения импеданса цепи, в которую они включаются.

Одной из наиболее простых в реализации и надежных конструкций шунтов является стержневой шунт, состоящий из параллельных стержней (проволочек) из высокоомного проводника с низким значением температурного коэффициента сопротивления [1]. Как правило, стержни располагаются по окружности между двумя электродами. Напряжение с шунта снимается с помощью измерительного кабеля, проходящего по оси шунта коаксиально стержням (таким образом, минимизируется индуктивность подсоединения). Стержневые шунты с успехом применяются для измерения сильных токов в частотном диапазоне до нескольких сотен килогерц. В связи с перспективами развития технологий [2] на основе импульсных электрофизических источников с высокой частотой следования импульсов, возникает задача разработки шунта с развитой поверхностью, обеспечивающей возможность естественного охлаждения, что не могут обеспечить дисковые, кольцевые и трубчатые шунты при тех же временных характеристиках. Отличием шунтов от пояса Роговского, применительно к указанным технологиям является возможность измерения постоянной составляющей импульса тока, наличием

только верхнего порога передаваемых частот, а не полосы частот, что характерно для поясов.

### Обоснование конструкции и расчет шунта

Представлялось целесообразным разработать стержневой шунт для измерения импульсного тока при разработке технологий, основанных на модификации технологических объектов мощными импульсными электрофизическими воздействиями, предполагаемой длительностью фронта импульса до 0,5-1 мкс и амплитудой 75 кА, вид шунта изображен на рис. 1, его фотография на рис. 2.

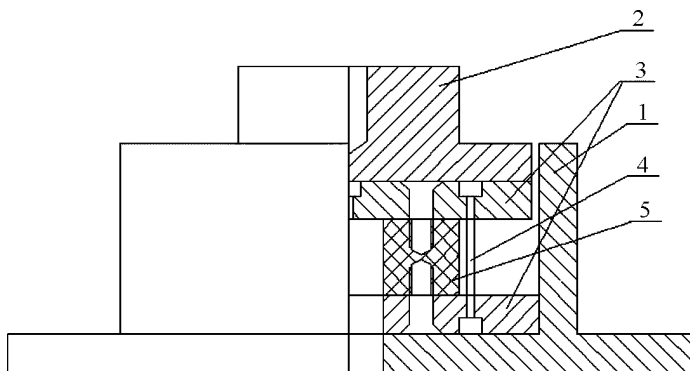


Рисунок 1 – Конструкция шунта

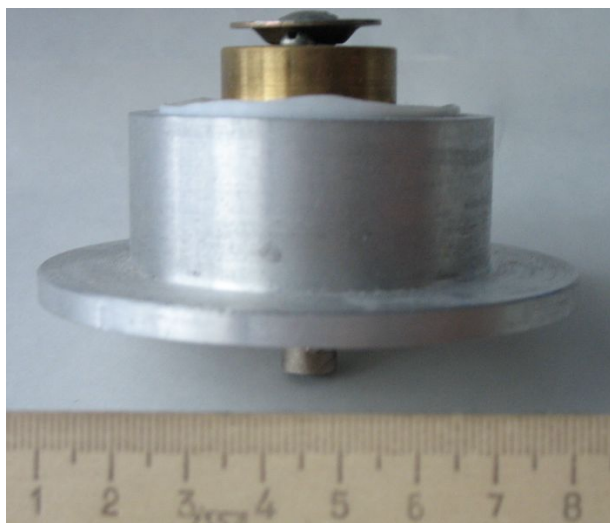


Рисунок 2 – Фотография шунта

Шунт подключается в разрыв цепи с измеряемым током и состоит из стакана (материал – дюралюмин) 1, крышки (латунь) 2, в стакане расположены два диска (латунь) 3, к которым крепятся нихромовые проволочки 4, между дисками находится керамический изолятор 5.

Общее сечение резистивного выбираем из условия термической стойкости [1]

$$S_u \geq \sqrt{\frac{I_m^2 \cdot t_u \cdot \rho}{c \cdot \Delta T \cdot \gamma}},$$

где  $t_u$  – длительность импульса,  $\rho$  – удельное сопротивление материала шунта,  $c$  – теплоемкость материала шунта,  $\Delta T$  – допустимый перегрев,  $S_u$  – площадь поперечного сечения,  $I_m$  – амплитуда измеряемого тока.

Индуктивность данного резистора рассчитывалась методом, предложенным в [3] для расчета коаксиальных шунтов. Индуктивность и омическое сопротивление такого шунта тогда определяются по формулам:

$$L_u = \frac{10^{-7} \cdot l}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln \frac{1 + \left(\frac{r_1}{D_u}\right)^2 - 2\left(\frac{r_1}{D_u}\right) \cos\left(2 \cdot \pi \cdot i/n\right)}{2\left(1 - \frac{r_2}{D_u}\right) \left(1 - \cos\left(2 \cdot \pi \cdot i/n\right)\right) + \left(\frac{r_2}{D_u}\right)^2};$$

$$R_u = \frac{\rho}{n} \frac{l}{\pi r_2^2},$$

где  $r_1$  – радиус центрального электрода,  $r_2$  – радиус проволочки,  $D_u$  – радиус расположения проволочек на периферии,  $n$  – количество проволочек,  $l$  – длина измерительной части шунта.

### Расчетные и экспериментальные характеристики

Эквивалентная схема [4] шунта с учетом измерительного кабеля и входных параметров электронного осциллографа приведена на рис. 3.

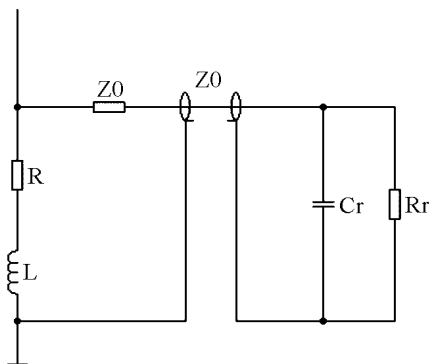


Рисунок 3 – Эквивалентная схема измерений

На схеме  $Z_0$  – волновое сопротивление измерительного кабеля (75 Ом),  $R, L$  – сопротивление и индуктивность шунта соответственно,  $C_r$  – входная емкость осциллографа,  $R_r$  – входное сопротивление осциллографа. Так как  $R_r = 1$  МОм, то его можно исключить из схемы.

Таким образом полная схема замещения шунта имеет вид, представленный на рис. 4.

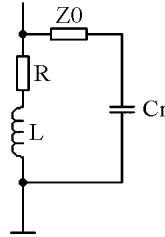


Рисунок 4 – Упрощенная схема измерений

Дифференциальное уравнение, из которого можно определить напряжение на экране электронного осциллографа имеет вид

$$\frac{d^2 U_c(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{dU_c(t)}{dt} + \omega^2 \cdot U_c(t) = \frac{R}{L \cdot C} \cdot J(t) + \frac{1}{C} \frac{dJ(t)}{dt},$$

где  $U_c(t)$  – напряжение на емкости,  $J(t)$  – измеряемый ток,  $\delta = \frac{R + Z_0}{2 \cdot L}$ ,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.$$

Его решение при нулевых начальных условиях имеет вид

$$U_c(t) = \frac{R - Z_0}{\omega^2 \sqrt{\delta^2 - \omega^2}} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta \cdot (t-z)} \cdot \sinh\left(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)\right) dz + \frac{1}{C} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta \cdot (t-z)} \cdot \cosh\left(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)\right) dz.$$

Попытка исследовать передаточные свойства шунта методом переходной характеристики наталкиваются на серьезные трудности. Действительно, если предположить, что измеряемый ток  $J(t)$  имеет вид единичного скачка  $1(t)$ , то за счет индуктивного падения напряжения (даже с учетом влияния согласующего сопротивления) мы получим напряжение  $U_c(t)$  с огромным выбросом.

Поэтому для анализа передаточных свойств шунта прямоугольный импульс тока заменяется импульсом с малой, но конечной длительностью фронта. Аналитическое выражение для такого импульса

$$J(t) = 1 + A \cdot e^{-a_1 \cdot t} - B \cdot e^{-b_1 \cdot t}.$$

И тогда для импульса вида

$$J(t) = 1 + 2,4 \cdot e^{-1,43 \cdot 10^7 \cdot t} - 3,4 \cdot e^{-1,02 \cdot 10^7 \cdot t},$$

график которого приведен на рисунке 5 (кривая 1), реакция шунта представлена на рис. 5 (кривая 2) (график построен в относительных единицах  $J^* = J(t)/J_{\max}$ ,  $U^* = U(t)/U_{\max}$ ). Время нарастания заданного рассчитываемого импульса составляет 600 нс, время нарастания рассчитанного напряжения на экране осциллографа составляет 572 нс. Погрешность в передаче фронта импульса не превышает 5 %.

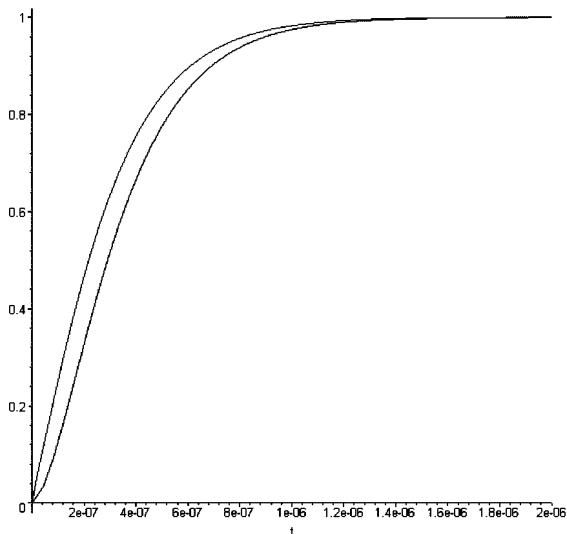


Рисунок 5 – Рассчитанная характеристика шунта

Калибровка шунта была проведена на генераторе аperiodических импульсов ГАИ-2. Измерение тока в цепи производилось калиброванным поясом Роговского, измерение сигналов производилось осциллографом Tektronix. Из осциллограммы установлено, что чувствительность шунта составила  $K = 350$  мВ/кА, фронт импульса, передаваемый без искажений 0,60 мкс.

### Заключение

Был создан стержневой шунт, обеспечивающий передачу импульсов тока с фронтами не менее 0,60 мкс и максимальной амплитудой 75 кА, позволяющий измерять импульсные токи в электрофизических установках.

Показана хорошая согласованность расчетных и экспериментально измеренных на импульсах с малым фронтом характеристик шунта. Получена экспериментальная чувствительность 350 мВ/кА.

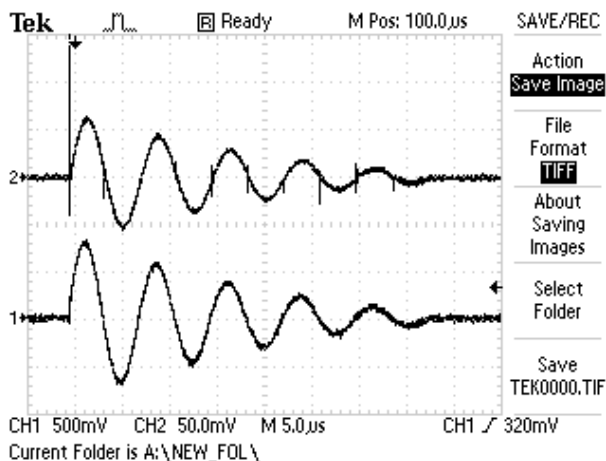


Рисунок 6 – Осциллограмма напряжения на шунте(1) и напряжения на выходе интегратора пояса Роговского(2)

**Список литературы:** 1. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения в переходных режимах короткого замыкания. – Л.: Энергия, 1981. – 192 с. 2. Арсенюк В.В., Базалеев Н.И., Донец С.Е. и др. / Стимулирование неоднородностей в сильноточных пучках электронов и их влияние на процессы массопереноса в облучаемых мишенях // Вопросы атомной науки и техники сер. Физика рад. поврежд. и радиац. материалов. – 2007. – № 6 (91). – С. 116-119. 3. Рябов Б.М. Измерение высоких импульсных напряжений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1983. – 124 с. 4. Бенгус В.З. Прецизионные шунты для измерения импульсных токов // Контрольно-измерительная техника. Республиканский межведомственный научно-тех. сборник. – 1976. – Вып. 20.

*Поступила в редколлегию 12.09.2008*

УДК 621.315

**В.В.ЗОЛОТАРЬОВ; В.П.КАРПУШЕНКО**, канд.экон.наук;  
**О.А.НАУМЕНКО**, канд.техн.наук; **В.М.ЗОЛОТАРЬОВ**, канд.техн.наук;  
 НТУ «ХП», Харків

## **ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОБОТИ ПОХИЛОЇ ЕКСТРУЗІЙНОЇ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ НА НАПРУГУ ДО 330 КВ ТА ЇХ ЗАВОДСЬКИХ ВИПРОБУВАНЬ**

Розроблено основні принципи спорудження першої в Україні похилої лінії вулканізації для вітчизняних конструкцій силових кабелів напругою до 330 кВ та їх заводських випробувань.

The main principles of the construction of the first in Ukraine inclined vulcanization line for Ukraine designs of power cables on voltage up to 330 kV and their factory tests have been developed.