

## Регистрация мегаамперных токов и мегавольтных напряжений на генераторе ГИТ-12

В.А. Кокшенев\*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

\*vak@oit.hcei.tsc.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты эксплуатации измерительной системы на многомодульном генераторе ГИТ-12. Измерительный комплекс включает в себя регистрацию выходных характеристик каждого из 12 модулей с помощью поясов Роговского при амплитудах до 500 кА в баках с масляной изоляцией и на входе вакуумных коаксиальных линий. Для измерения токов амплитудой до 10 МА и скоростью нарастания до 100 ТА/с использованы датчики в виде индуктивной канавки. Для регистрации напряжения мегавольтного диапазона используется высокоимпедансная короткозамкнутая магнитоизолированная линия, в которой на короткозамкнутом конце установлены пояс Роговского и датчик в виде индуктивной канавки. Даны характеристики используемых канавок и рекомендации по выбору материала и конструкции таких датчиков.

**Ключевые слова:** индуктивная канавка, магнитоизолированная линия.

### 1. Введение

В мощных импульсных системах необходимо измерять токи мегаамперного диапазона, имеющих фронт импульса от  $10^{-6}$  с до  $10^{-8}$  с со скоростью нарастания  $\geq 10^{13}$  А/с. Использование пояса Роговского не всегда возможно по технологическим, а чаще по электрофизическим причинам. При индуктивности полости, где размещен пояс Роговского, единицы нГн амплитуда напряжения может составлять десятки кВ. Известны датчики в виде экранированных магнитных петель (*B-dot*) [1], измеряющие производную тока в локальной области. Любой электрический датчик для измерения тока вносит в цепь с измеряемым током неоднородность, на которой возникает разность потенциалов, определяемая этим током. В начале работ на генераторах ГИТ-4 – ГИТ-12 [2, 3] наши усилия были направлены на создание электрического датчика с минимальной разностью потенциалов. Таковым была выбрана индуктивная канавка (рис. 1) по следующим соображениям. Во-первых, индуктивность канавки  $L$  может иметь величину  $\leq 10^{-10}$  нГн для того, чтобы создаваемая разность потенциалов не превышала  $\sim 1$  кВ. Во-вторых, конструкция канавки и вывода сигнала с нее могут быть выполнены так, чтобы максимально удалить из межэлектродного промежутка и области возникновения разности потенциалов диэлектрик. В-третьих, с помощью такого датчика можно регистрировать ток как на внешнем (земляном), так и на внутреннем (потенциальном) электроде [4].

Сигнал  $U_C$  с индуктивной канавки можно представить суммой двух величин  $U_C = U_L + U_R$ , где  $U_L = Ldl/dt$  – индуктивная составляющая сигнала,  $U_R = RI(t)$  – активная составляющая сигнала, зависящая от временных параметрах процесса и характеристик материала канавки. Для формы тока вида  $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t)$  сигнал с канавки имеет вид  $U_C(t) = L\omega I_0 \cdot \cos(\omega t) + RI_0 \cdot \sin(\omega t)$ . Отношение активной составляющей к индуктивной равно  $U_R/U_L = R \operatorname{tg}(\omega t)/L\omega$ . Для материалов с магнитной проницаемостью  $\mu$  ток течет в скин-слое толщиной  $\delta$  (рис. 1)  $\delta(\text{см}) \cong 5033(\rho T/\mu)^{1/2}$ , где  $\rho$  – Ом·см,  $T = 2\pi/\omega$  – период колебаний (с). Для  $\Delta \ll l$ ,  $D$  и очень высокой частоты отношение активной составляющей к индуктивной равно  $U_R/U_L \cong 5 \cdot 10^3(\rho\mu T)^{1/2}/\Delta$ . Для получения тока сигнал  $U_C$  следует проинтегрировать  $I_C(t) = \int U_C(t)dt/L = I_0 \cdot \sin(\omega t) + I_0 \cdot (1 - \cos(\omega t))R/L\omega = I(t) + I_R(t)$ . Видно, что появляется добавка  $I_R(t)$ , связанная с конечной проводимостью и магнитными свойствами материала индуктивной канавки и приводящая к ошибке измерения  $I_R(t)/I(t) = R(1 - \cos(\omega t))/L\omega \sin(\omega t) \cong 5 \cdot 10^3(\rho\mu T)^{1/2}(1 - \cos(\omega t))/\Delta \sin(\omega t)$ . Из

полученного выражения следует, что для уменьшения погрешности измерения необходимо использовать немагнитный материал с высокой проводимостью, а также увеличивать индуктивную составляющую, расширяя зазор  $\Delta$  (рис. 1). Эти пути имеют свои недостатки. Как правило, материалы с малым  $\rho$  не обеспечивают требуемой механической прочности при использовании в конструкции мощных импульсных установок. Увеличение зазора  $\Delta$  приводит к росту сигнала  $U_C$  и ограничено электрической прочностью изоляции в месте съема сигнала.

Для используемых в наших экспериментах материалах – дюралюминия, нержавеющей стали и меди – удельные сопротивления ( $\rho$ ) соответственно равны  $2.8 \cdot 10^{-6}$ ,  $75 \cdot 10^{-6}$  и  $1.75 \cdot 10^{-6}$  Ом·см. Как видно, использование меди приводит к уменьшению ошибки измерения в 6.5 раза по сравнению с нержавеющей сталью при прочих равных условиях. Полученные оценки сделаны с расчетом индуктивности на очень высокой частоте. Учет магнитного потока внутри проводника приводит к увеличению индуктивности датчика и, следовательно, к уменьшению ошибки измерения в  $[1+2516(\rho T)^{1/2}]$  раз. Таким образом, определив чувствительность при калибровке на низкой частоте, можно определить поправку для любого диапазона времени. С учетом данной поправки в таблице 1 приведены характеристики датчиков из обычно используемых нами материалов – нержавеющей стали (SS), меди (Cu) и алюминия (Al). Для канавки из железа ( $\mu \sim 10^3$ ) ошибка в измерении амплитуды тока с фронтом 1 мкс может составлять 100 % и более.

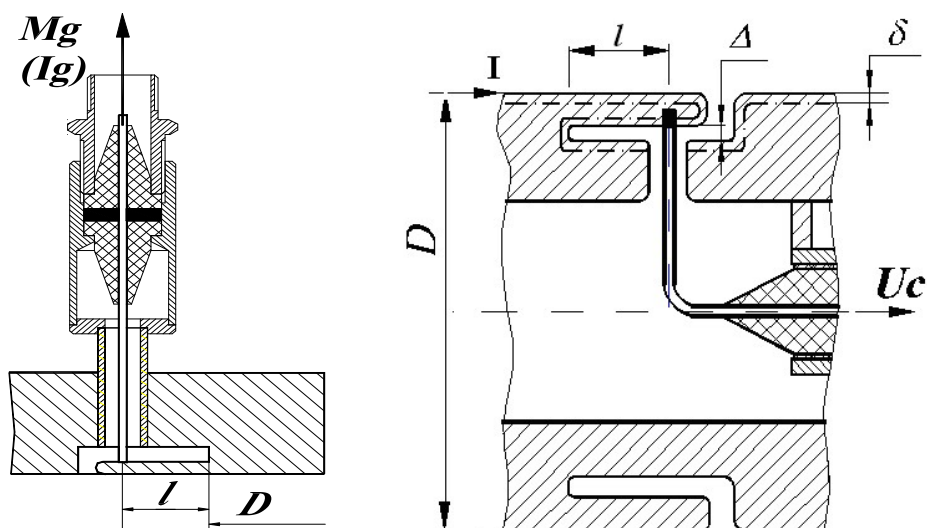


Рис. 1. Датчики тока на базе индуктивной канавки. Слева, вариант радиальной канавки, установленной на фланце центрального узла из нержавеющей стали на диаметре  $D = 650$  мм для измерения тока генератора  $I_g$ .

Справа, вариант цилиндрической канавки из меди, установленной на центральном электроде магнитоизолированной линии ( $D = 50$  мм).  $\delta$  – толщина скин-слоя,  $\Delta$  – вакуумный зазор в канавке,  $l$  – длина канавки.

Таблица 1. Характеристики датчиков.

Материал	Cu	Cu	Al	Al	SS	SS
$\rho$ , Ом·см	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$
$T/4$ , с	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\delta$ , см	0.0132	0.0042	0.0167	0.0053	0.0866	0.0274
$I_R/I$ , %	2.63	0.8	3.28	1	15	5.26
$\Delta = 0.5$ см						
$\tau_D = L/R$ , мкс	24	7.6	19	6	4	1.3
$\Delta = 0.5$ см						

Анализ для тока экспоненциальной формы показал, что ошибка измерения в этом случае имеет тот же порядок величины. Действительно для тока вида  $I(t) = I_0 \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$  величина  $I_R(t)/I(t) = R\tau F(t/\tau)/L \cong 9.2 \cdot 10^3 (\rho\tau)^{1/2} F(t/\tau)/\Delta$ , где  $F(t/\tau) = (\exp(-t/\tau) + t/\tau - 1)/(1 - \exp(-t/\tau))$ . Для  $t = 3\tau$  в таблице 2 приведены характеристики датчиков для экспоненциальной формы тока.

Таблица 2. Характеристики датчиков для экспоненциальной формы тока.

Материал	Cu	Cu	Al	Al	SS	SS
$\rho$ , Ом·см	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$
$3\tau$ , с	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$I_R/I$ , % $\Delta = 0.5\text{см}$	3	0.9	3.84	1.21	19.8	6.3

При использовании для канавки параметра  $\tau_D = L/R \cong \pi \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \cdot (T/\rho)^{1/2}$  в приведенном выше выражении для тока истинное значение  $I(t)$  рассчитывается по формуле (1):

$$I(t) = \exp(-t/\tau_D) \int_0^t (U_c(t)/L) \exp(t/\tau_D) dt. \quad (1)$$

## 2. Принципиальная схема генератора ГИТ-12

На рисунке 2 приведена принципиальная схема генератора ГИТ-12 с указанием расположения датчиков электрофизических измерений. Генератор импульсов тока состоит из 12 параллельных модулей, конструкция которых приведена на рис. 3. Каждый модуль включает первичный емкостный накопитель энергии, проходной вакуумный изолятор, демфирующий резистор и передающую вакуумную коаксиальную линию (ВКЛ) с магнитной самоизоляцией. Емкость первичного емкостного накопителя в ударе равна 14.4 мкФ, индуктивность до сборного электрода  $\sim 90$  нГн. При зарядном напряжении 50 кВ запасаемая энергия составляет  $\sim 2.6$  МДж. Система цифровой регистрации включает 16 каналов (200 МГц), 28 каналов (500 МГц), 8 каналов (1 ГГц). Кроме того, имеется 32-х канальная система регистрации времен срабатывания импульсов запуска и срабатывания (пусковых схем) генераторов Маркса и источников плазмы с временным разрешением 5 нс.

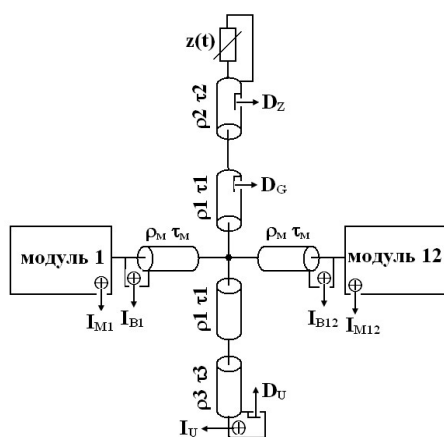


Рис. 2. Принципиальная схема генератора ГИТ-12: модули 1–12 – 12 модулей. Параметры отрезков ВКЛ:  $\rho_m = 13.4$  Ом,  $\tau_m = 13.3$  нс – 12 вакуумных коаксиальных линий,  $\rho_1 = 3.9$  Ом,  $\tau_1 = 0.78$  нс,  $\rho_2 = 8.7$  Ом,  $\tau_2 = 0.8$  нс,  $\rho_3 = 92$  Ом,  $\tau_3 = 6.9$  нс – вакуумная короткозамкнутая измерительная линия.  $D_U$ ,  $D_G$ ,  $D_Z$  – индуктивные канавки,  $I_U$ ,  $I_{B1}$ – $I_{B12}$ ,  $I_{M1}$ – $I_{M12}$  – пояса Роговского,  $z(t)$  – нагрузка.

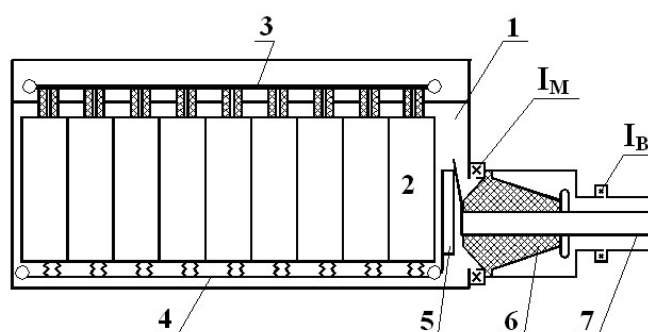


Рис. 3. Конструкция модуля генератора ГИТ-12: 1 – металлический бак с трансформаторным маслом, 2 – девять параллельных секций по схеме 12-каскадного генератора Маркса, 3 – зарядно-пусковой электрод, 4 – высоковольтный электрод, 5 – демфирующий резистор, 6 – проходной вакуумный изолятор, 7 – передающая вакуумная коаксиальная линия,  $I_M$ ,  $I_B$  – пояса Роговского.

Для измерения формы и амплитуды импульса тока в нагрузке используются индуктивные канавки  $D_G$  и  $D_Z$ . Токи измеряются на сборном электроде центрального узла датчик  $D_G$  ( $I_G$ ) и на коаксиальном переходе к радиальной линии  $D_Z$  ( $I_Z$ ), в центре которой размещена нагрузка. Для определения симметричности ввода тока на входе узла нагрузки сигнал с индуктивной канавки  $D_Z$  регистрируется в 3 точках, расположенных симметрично по азимуту через  $120^\circ$ . Кроме того, устанавливались магнитные петли ( $B\text{-dot}$ ) на радиусах 3, 6, 9 и 13 см. Для регистрации напряжения мегавольтного диапазона используется высокоимпедансная короткозамкнутая ВКЛ, в которой на короткозамкнутом конце установлены пояс Роговского ( $I_U$ ) и датчик  $D_U$  в виде индуктивной канавки. Получаемые осциллограммы  $U_L$ ,  $I_G$ ,  $I_Z$  позволяют рассчитывать индуктивность участка схемы от сборного электрода до нагрузки  $L_v = \int U_L(t)dt/I_G(t)$ , а также изменение импеданса нагрузки  $z(t) = dL_z/dt + r_z(t)$  в процессе ввода в нее энергии.

Для нахождения напряжения на входе короткозамкнутой линии, включенной параллельно нагрузке, достаточно измерять ток на короткозамкнутом конце [5]:

$$U_{\rho_3}(t) = 0.5 \cdot \rho_3 \cdot [I_U(t + \tau_3) - I_U(t - \tau_3)], \quad (2)$$

где  $\rho_3$ ,  $\tau_3$  – волновое сопротивление и электрическая длина измерительной линии соответственно;  $I_U$  – ток на короткозамкнутом конце линии. В нашем случае в экспериментах с лайнером использование величины  $\rho_3$ ,  $\tau_3$  для определения напряжения на входе линии в момент формирования пинча с быстрым ростом импеданса нагрузки правомерно, потому что к этому моменту времени в короткозамкнутой линии реализуется режим магнитной изоляции. Это связано с созданием магнитного поля током, протекающим в короткозамкнутой измерительной линии в начальной стадии имплозии лайнера с малой величиной  $z(t)$ . Как показано в работе [6], наличие тока подмагничивания, превышающего в нашем случае в 3–5 раз минимальный ток самоизоляции в линии с волновым сопротивлением  $\rho_3 = 92$  Ом для напряжения 2–3 МВ, параметры измерительной линии с ошибкой  $\leq 5\%$  соответствуют величинам  $\rho_3$ ,  $\tau_3$ , как минимум, в течении двойного времени пробега импульса. Кроме того, установка индуктивной канавки  $D_U$  индуктивностью 0.21 нГн на короткозамкнутом конце измерительной линии позволяет иметь индуктивный делитель напряжения с высоковольтным плечом в виде индуктивности тракта до центрального электрода с коэффициентом деления 3030 раз. На рис. 4 приведены осциллограммы токов и напряжения в эксперименте с дейтериевым лайнером (#2740), а на рис. 5 расчетное напряжение  $U_Z$  на пинче в момент генерации излучения. К этому моменту времени ток в измерительной линии достиг 140 кА, при минимальном токе магнитной изоляции для  $\rho = 92$  Ом при напряжении 2 МВ равно 33 кА. Напряжение  $U_Z$  на пинче определено 2 способами; кривая 1 соответствует напряжению  $U_{Z1} = U_L + L_v \cdot dI_G/dt$ , где  $U_L$  – напряжения на сборном электроде, рассчитанное по сигналу  $U_{Du}$  с учетом коэффициента деления, а  $L_v$  – индуктивность узла нагрузки до центрального электрода. Кривая 2 – напряжение  $U_{Z2} = U_{\rho_3} + L_v \cdot dI_G/dt$ , где  $U_{\rho_3}$  – напряжение в короткозамкнутой ВКЛ ( $\rho_3 = 92$  Ом,  $\tau_3 = 6.9$  нс), рассчитанное по формуле 2 по току  $I_U$ . Полученные величины  $U_Z$  имеют удовлетворительное согласие с учетом принятых допущений и погрешности регистрации величин  $U_L$ ,  $I_G$  и  $I_U$ .

Для калибровки коэффициента деления измерительной короткозамкнутой линии с датчиком  $D_U$  была собрана схема с низкоимпедансной нагрузкой индуктивностью  $L_{cal} = \rho_1 \cdot \tau_1 + L_{SC} = 16$  нГн (рис. 6), в которой параллельно измерительной линии подключен высоковольтный кабель РК-75-17 с волновым сопротивлением  $\rho = 75$  Ом и электрической длиной  $\tau_{75} = 140$  нс. Кабель РК-75-17 был нагружен на высоковольтный согласованный делитель  $R_1 + R_2 = 75$  Ом с коэффициентом деления  $K_R = 360 = U_L/U_{cal}$ , где  $U_L = U_{cal} \cdot K_R$  –

напряжение на центральном электроде генератора. На рис. 7, приведены осциллограммы с датчика  $D_U$  ( $U_{LU}$ ) с учетом коэффициента деления  $K_{Lu} = L_U/L_{Du} = 3030$ ,  $U_{Lu} = U_{Du} \cdot 3030$  и низковольтного плеча делителя  $R1+R2$   $U_{cal}$  с учетом коэффициентом деления  $K_R = 360$  ( $U_L = U_{cal} \cdot K_R$ ). Полученные осциллограммы хорошо согласуются между собой; площади под обеими осциллограммами равны между собой с погрешностью  $\leq 3\%$ .

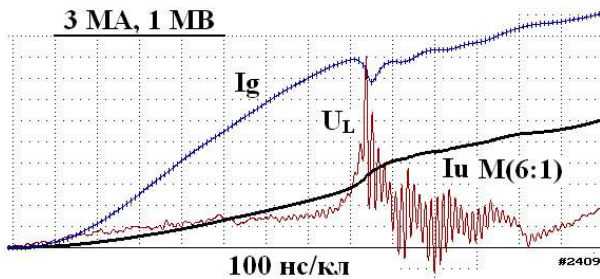


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжения в эксперименте с дейтериевым лайнером.  $I_U, I_G$  – токи с пояса Роговского ( $I_U$  увеличенный масштаб 6:1, 50 кА/кл.) и индуктивной канавки  $D_G$  с чувствительностью 9.1 А/нс·В,  $U_L$  – напряжение на центральном электроде.

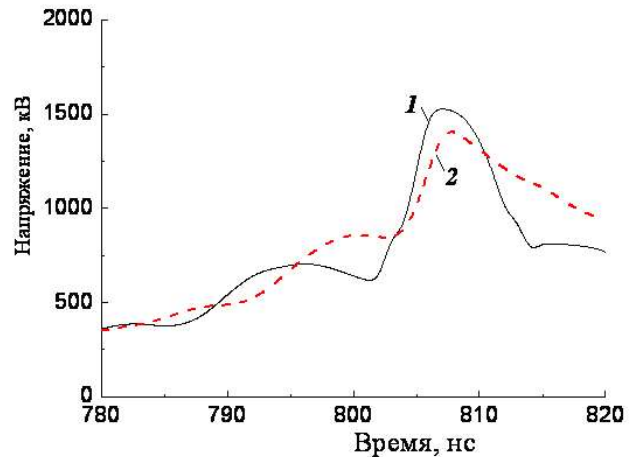


Рис. 5. Напряжение  $U_Z$  на пинче в момент генерации излучения, 1 –  $U_Z = U_L + L_V \cdot dI_Z/dt$ , 2 –  $U_Z = U_{\rho 3} + L_V \cdot dI_Z/dt$ , где  $U_{\rho 3}$  – напряжение в короткозамкнутой ВКЛ ( $\rho_3 = 92$  Ом,  $\tau_3 = 6.9$  нс), рассчитанное по току  $I_U$ .

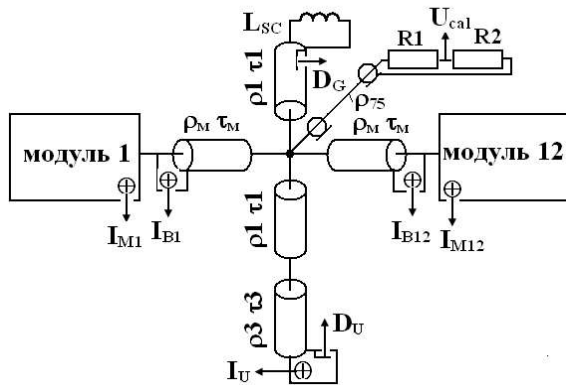


Рис. 6. Схема калибровки датчиков тока и напряжения на генераторе ГИТ-12.

Короткозамкнутый участок  $\rho_1 \tau_1 + L_{SC}$  индуктивностью 16 нГн, калибровочный кабель  $\rho_{75}$  (ПК-75-17) с высоковольтным делителем  $R1+R2 = 75$  Ом с коэффициентом деления  $K_R = 360$ .

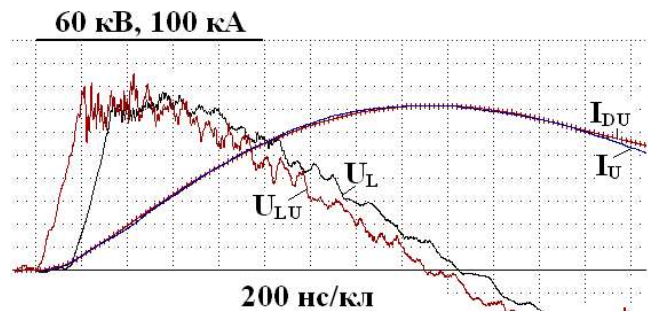


Рис. 7. осциллограммы напряжения с калибровочного делителя  $U_L = U_{cal} \cdot K_R$  и индуктивного делителя  $U_{Lu} = U_{Du} \cdot 3030$ .

### 3. Заключение

На установке ГИТ-12 успешно используются датчики в виде индуктивной канавки для измерения производной тока  $dI/dt$ . В данной работе рассмотрены характеристики датчиков из материалов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, приведены конструкции датчиков разной модификации, используемых для измерения токов амплитудой до 10 МА и скоростью нарастания до  $10^{14}$  А/с. Описана схема измерения напряжения мегавольтного

диапазона с помощью короткозамкнутой вакуумной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 92 Ома, включенной параллельно Z-пинч нагрузке. Рассмотрен возможный метод калибровки схемы измерения напряжения.

#### **Благодарность**

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

#### **4. Литература**

- [1] W.A. Stygar et al, D-dot and B-dot monitors for Z-vacuum-section power-flow measurements, *11<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, USA, NJ, 1258, 1997.
- [2] A.N. Bostrikov, S.P. Bugaev, A.M. Volkov, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, V.A. Kokshenev, G.A. Mesyats, F.I. Fursov, V.P. Yakovlev, Some POS operating regimes on the GIT-4 generator, *8<sup>th</sup> Int. Conf. on High-Power Particle Beams*, Novosibirsk, USSR, 394, 1990.
- [3] С.П. Бугаев, А.М. Волков, А.А. Ким и др., ГИТ16: мегаджоульный импульсный генератор с плазменным ключом для нагрузок типа Z-пинча, *Изв. вузов. Физика*, **40**(12), 38, 1997.
- [4] V.A. Kokshenev, Sensor of megaampere range current with risetime up to 100 TA/s, *6th International Congress Energy Fluxes and Radiation Effects, Book of Abstracts*, Tomsk, Russia, 120, Sept. 2018.
- [5] M.E. Savage, C.W. Mendel, T.W. Grasser, W.W. Simpson and D, M. Zagar, Time-resolved voltage measurements in terawatt magnetically insulated transmission lines, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**(12), 3812, 1990.
- [6] S.Ya. Belomytsev, A.A. Grishkov, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.A. Zherlitsyn, Megavolt range voltage measurement in vacuum through a short-circuited line, *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 104702, 2011.