

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ РОТОРНЫЙ ВОЛЬТМЕТР,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ
УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОНОВ**

Описано устройство прибора, используемого в системе измерения и стабилизации ускоряющего напряжения промышленных ускорителей электронов типа ЭЛВ. В диапазоне напряжений 50 кВ...3 МВ вольтметр обеспечивает точность измерения высокого напряжения не хуже 1 %.

Ключевые слова: высокое напряжение, роторный вольтметр.

Достаточно часто в науке и технике требуется измерять высокие постоянные напряжения. В диапазоне напряжений до 100 кВ эта задача обычно решается с помощью резистивных делителей напряжения. При измерении напряжений в диапазоне до 3 МВ резистивный делитель напряжения становится громоздким. Отметим, что и надежность делителя в этой области напряжений снижается по причине возможных коронных разрядов, приводящих к разрушению резисторов. Для измерения ускоряющего напряжения высоковольтного выпрямителя промышленного ускорителя электронов типа ЭЛВ (максимальная энергия до 2,5 МэВ) был разработан роторный вольтметр, погрешность которого составляет порядка 1 %. При проектировании вольтметра была поставлена задача сделать его компактным, не требующим обслуживания, работающим в атмосфере элегаза при давлении до 10 атмосфер.

Роторные вольтметры достаточно широко применялись для измерения высокого напряжения в генераторах Ван де Графа. В этих вольтметрах использовался компенсационный принцип измерения. Этот принцип требует наличия двух вращающихся крыльчаток и дополнительного электрода, на который необходимо подать компенсирующее напряжение. Обычно величина это-

го напряжения составляет несколько киловольт.

Промышленные ускорители электронов работают в чрезвычайно агрессивной среде (высокий уровень озона и радиации). Агрессивная среда затрудняет ввод высокого напряжения на компенсационный электрод.

Для минимизации размеров и упрощения конструкции мы отказались от компенсационного принципа, так как требуемая точность заведомо обеспечивается и прямыми методами.

Принцип действия роторного вольтметра основан на эффекте индуцирования зарядов на металлических поверхностях, помещенных в электрическое поле [1–3]. В данной конструкции неподвижный диск и вращающаяся заземленная металлическая крыльчатка установлены соосно и перпендикулярно линиям напряженности электрического поля (рис. 1, 2).

Неподвижный диск изготовлен из диэлектрика, на поверхности которого методом металлизации образованы две пары обкладок. Крыльчатка имеет два противоположно расположенных крыла. Вращаясь, они либо открывают, либо экранируют обкладку от действия электрического поля.

Произведем оценку выходного тока, описываемого вольтметром. Для определения максимальной величины заряда на обкладке

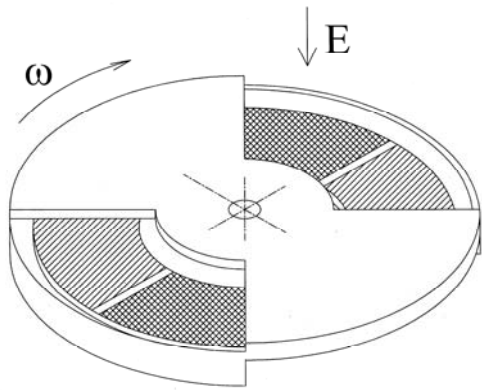


Рис. 1. Взаимное расположение неподвижного диска (измерительных пластин) и вращающейся крыльчатки роторного вольтметра

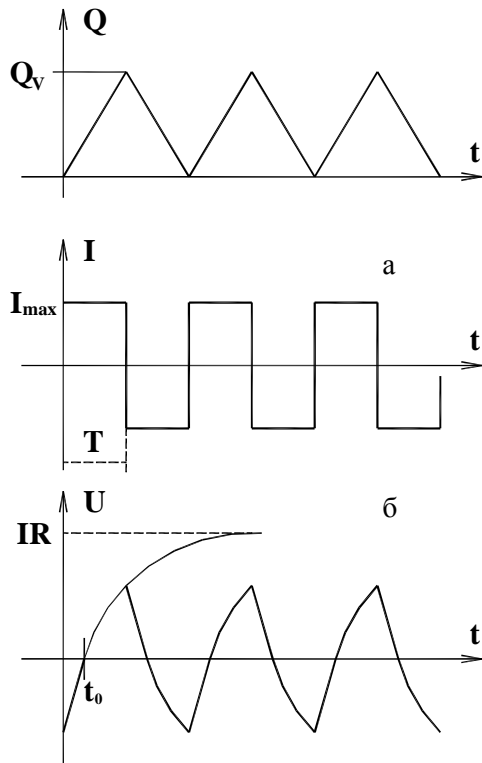


Рис. 2. Форма сигналов в цепях роторного вольтметра: а – изменение заряда на измерительной пластине; б – ток, отдаваемый в измерительную цепь; в – форма напряжения в измерительной цепи, образованной параллельно соединенными резистором и конденсатором

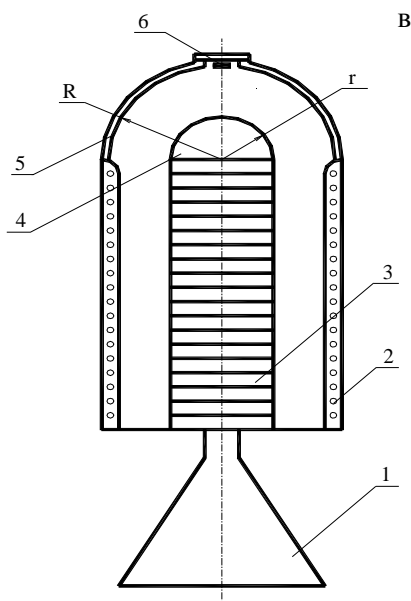


Рис. 3. Место установки роторного вольтметра на ускорителе ЭЛВ: 1 – выпускное устройство; 2 – первичная обмотка; 3 – высоковольтный выпрямитель; 4 – высоковольтный электрод; 5 – стальной бак ускорителя; 6 – роторный вольтметр

воспользуемся формулой для емкости сферического конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 rR}{R-r}.$$

Величина заряда конденсатора

$$Q = CU.$$

Поверхностная плотность заряда

$$\delta = \frac{CU}{S_R},$$

где S_R – площадь поверхности сферы бака с радиусом R . Максимальный заряд, индуцированный на обкладке вольтметра

$$Q_V = \delta S_V,$$

где S_V – площадь обкладки вольтметра. Выходной ток обкладки определяется изменением заряда в единицу времени. Форма тока представляет собой периодический прямоугольный сигнал, и его амплитудное значение будет равно

$$I_{\max} = \frac{Q_V}{T}.$$

Численные расчеты и экспериментальные измерения показывают, что для характерных размеров высоковольтного выпрямителя ускорителя ЭЛВ ($r = 0,38$ м, $R = 0,75$ м, диаметр обкладки – 100 мм) выходной ток будет равен 2,5 мкА/МВ. Такой ток достаточно просто измеряется.

Произведем оценку погрешности роторного вольтметра в зависимости от нестабильности скорости вращения крыльчатки. Форма выходного напряжения при RC характере входной измерительной цепи (емкость $C = 8$ нФ, сопротивление $R = 2,4$ МОм) соответствует рис. 3.

Выходное напряжение роторного вольтметра (U) описывается выражением

$$U(t) = \frac{1}{C} \int \left(I - \frac{U}{R} \right) dt. \quad (1)$$

После дифференцирования выражения (1) решим полученное уравнение, задавая граничными условиями. В итоге выражение для среднего напряжения с двух обкладок примет вид

$$\bar{U}_2 = \frac{2Q_V R}{T} \left(1 + \frac{2RC}{T} \ln \left(\frac{e^{\frac{T}{RC}} + 1}{2} \right) \right).$$

Анализируя последнее выражение, можно показать, что для обеспечения процентной точности измерений необходимо поддерживать скорость вращения крыльчатки не хуже, чем с 20 %-й погрешностью.

Роторный вольтметр реализован на основе малогабаритного, высокооборотного, прямоприводного электродвигателя (такие двигатели применяются в приводах винчестерских дисков и в видеомагнитофонах). Его применение позволило разработать вольтметр с малыми размерами: наружный диаметр около 100 мм, высота около 40 мм. Малые габариты облегчают установку роторного вольтметра в ускоритель или в какую-либо другую высоковольтную установку. К настоящему времени несколько десятков подобных вольтметров установлены в ускорителях типа ЭЛВ и успешно работают.

Опыт эксплуатации вольтметра позволяет сделать вывод, что он может быть использован не только для высоковольтных выпрямителей промышленных ускорителей электронов, но и для других высоковольтных электрофизических установок.

Список литературы

1. Левитов В. И. Вольтметр вращающийся // Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1960.
2. Бейер М., Бёк В., Мёллер К., Цаенгель В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Henderson J. E., Goss W. H., Rose J. E. The Use of the Rotary Voltmeter for Measurements up to 830 kilovolts // Review of Scientific Instruments. 1992. Vol. 6. P. 63–65.

Материал поступил в редколлегию 15.06.2010

N. K. Kuksanov, P. I. Nemytov, Y. I. Golubenko

SMALL-SIZED ROTARY VOLTMETER IN SYSTEMS MEASUREMENT AND STABILIZATION ACCELERATING VOLTAGE FOR INDUSTRIAL ELECTRON ACCELERATORS

The device is used in system of measurement and stabilization of the accelerating voltage of industrial accelerators of electrons ELV type is described. For range of voltage 50 кV ... 3 MV the voltmeter provides accuracy of measurement of a high voltage not worse 1 %.

Keywords: a high voltage, rotating voltmeter.