

ВАКУУМНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИИС И АСУ ТП

Представлен ряд вакуумных емкостных делителей напряжений для систем автоматического регулирования и контроля рабочих режимов высоковольтных (более 1 кВ) высокочастотных (до 90 МГц) цепей. Рассмотрены преимущества их использования в качестве средств измерений. Приведены математические выражения для оценки погрешностей.

Вопросы точности, достоверности, повторяемости результатов измерений параметров высоких напряжений сохраняют свою актуальность как в производстве высоковольтных вакуумных приборов (вакуумные конденсаторы, вакуумные выключатели и переключатели), так и при оценке работоспособности высоковольтных цепей и блоков мощных радиотехнических устройств и электрофизических установок. При этом возникает необходимость в непрерывных (иногда до 1000 ч) измерениях амплитуд и определениях форм электрических сигналов в высоковольтных цепях и формирующих блоках. Частотный спектр исследуемых процессов находится в диапазоне от 0 до 100 МГц.

Существует множество методов измерений высоких напряжений [1]. Из них наибольшее распространение получили методы, использующие шаровые разрядники, статические киловольтметры и масштабные преобразователи (делители напряжений). Зависимость электрических характеристик, используемых в средствах измерений твердых и жидких диэлектриков от частоты, амплитуды напряжения и мощности сигнала, влияние на результат измерений условий окружающей среды и другие ограничения делают проблематичным их применение для измерения высокочастотных напряжений выше 1 кВ на частотах 30–90 МГц.

Исследования физики явлений в газовых средах, работы по обнаружению дефектов в электрических трансформаторах, контроль прерывистых режимов питания модуляторных ламп, СВЧ-приборов и выходных напряжений генераторов импульсных напряжений (ГИН) выделили измерительные устройства с делителями напряжения как средства преимущественного применения для наблюдения формы генерируемых импульсов. Причем точность измерений амплитуд импульсных сигналов характеризуется погрешностью 1–3% [2, 3].

В свою очередь делитель должен:

- являться малой нагрузкой для источника сигнала;
- потреблять минимум энергии измеряемого сигнала;
- обладать стабильностью параметров и характеристик элементов конструкции во времени и к внешним воздействующим факторам;
- иметь защиту от попадания высокого напряжения в измерительную цепь низкого напряжения;
- иметь минимальные габаритные размеры при максимальном рабочем напряжении;
- иметь постоянное значение коэффициента деления в рабочих диапазонах частот и напряжений.

Независимо от конструктивного исполнения делителя его эквивалентные схемы представляют собой комбинации сосредоточенных элементов – индуктивности, емкости, активных сопротивлений. В зависимости от типа основных элементов схемы замещения (т.е. элементов, несущих максимальную электрическую нагрузку) делители бывают резистивные, индуктивные и емкостные. Анализ работы устройств, соответствующих основным элементам, показал, что емкостные делители напряжений потребляют минимум энергии измеряемого сигнала и могут использоваться до частот, на которых при номинальном напряжении происходит пробой внешней изоляции. Причем наилучшими характеристиками обладают емкостные делители, содержащие конденсаторы с газообразным диэлектриком [4].

Неоспоримые преимущества газообразного диэлектрика (тангенс угла потерь на частоте 50 Гц равен 10^{-9} , независимость диэлектрической проницаемости от частоты и температуры, полное отсутствие явления абсорбции) делают его незаменимым в образцовых конденсаторах. В то же время высокая электрическая прочность, восстанавливаемость электрической прочности после пробоя, низкая индуктивность и высокая добротность (от 1000 до 10000) позволяют эффективно использовать конденсаторы с газообразным диэлектриком и в частности с вакуумным, в высоковольтной высокочастотной технике [5]. Тем самым вышеперечисленные преимущества вакуумной изоляции свидетельствуют о необходимости рассмотрения вопроса ее применения в масштабных преобразователях высоких высокочастотных напряжений.

Первый отечественный вакуумный высоковольтный делительный конденсатор типа К61-8 появился в конце 1960-х гг. [6, 7]. Общий вид и эквивалентная схема конденсатора изображены на рисунке 1.

Основой конструкции (рис. 1,а) является газонепроницаемая металло-стеклянная оболочка с давлением остаточных газов внутри $10^{-3} \dots 10^{-5}$ Па. Оболочка 4 окружает системы электродов 1, 2, 3, образующих два или несколько конденсаторов (рис. 1,б), и фиксирует их расположение в пространстве. Конфигурация и шероховатость поверхности противокоронного электрода 5, а также применение высококачественных вспомогательных электроизоляционных материалов (например, стекла молибденовой группы) для вакуум-плотной оболочки создают необходимые условия исключения коронного разряда и сведения к минимуму токов утечек (порядка единиц, в худшем случае десятка мкА). Соотношение емкостей C_{12} , C_{13} , C_{23} конденсаторов подобрано таким образом, что выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ оказывается меньше относительно напряжения на входе $U_{\text{ВХ}}$ схемы замещения в заданное число раз. Причем емкость C_{12} образует плечо высокого напряжения, а емкость C_{23} – плечо низкого напряжения.

На рисунке 1,а: 1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – экраный электрод; 4 – газонепроницаемая оболочка; 5 – противокоронный электрод; 6 – основание.

На рисунке 1,б: C_{12} – емкость, образованная между 1 и 2 электродами; C_{23} – емкость, образованная между 2 и 3 электродами; C_{13} – емкость, образованная между 1 и 3 электродами; $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ – входное и выходное напряжения соответственно.

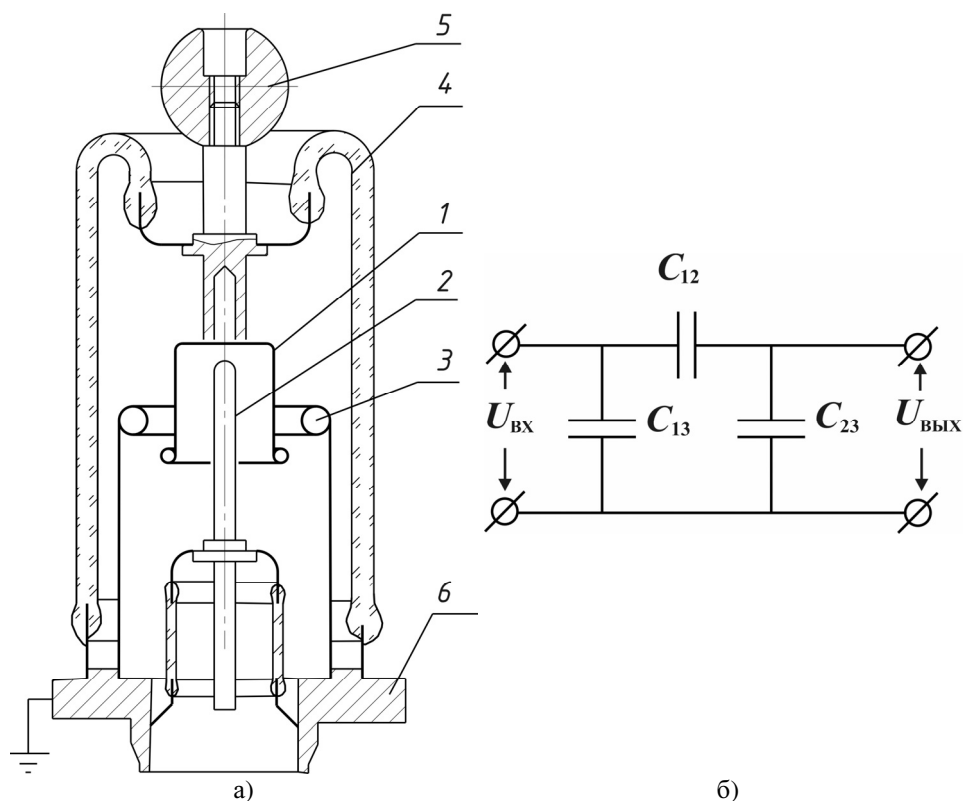


Рис. 1 Вакуумный емкостный делитель напряжений:
а – общий вид ВЕДН; б – эквивалентная схема ВЕДН

К61-8 имеет надежное экранирование низкопотенциального электрода 2 от внешних электромагнитных полей интенсивностью 100 А/м и 500 В/м [8]. Экранирование осуществляется высокопотенциальным стаканообразным электродом 1 и дополнительным экраным электродом 3, установленным на основании 6. Для получения необходимого коэффициента деления изготовители радиотехнических устройств вынуждены были подключать параллельно выходу делительного конденсатора конденсаторы постоянной емкости с твердым диэлектриком. Выявленные в процессе эксплуатации недостатки (температурная нестабильность, разница диэлектрических постоянных изоляционных материалов, невысокая точность коэффициента деления) были устранены в ВЕДН типа К61-17. В конструкцию данного делителя при участии автора был введен вновь созданный конденсатор переменной емкости [9], исключавший применение конденсаторов постоянной емкости с твердым диэлектриком и обеспечивающий выставление коэффициента деления с заданной точностью.

Начавшееся формирование метрологического обеспечения создания и производства электрофизических установок потребовало увеличения рабочего напряжения делительных конденсаторов до 100 кВ (К61-18) и создания на их основе серии делителей. В отличие от своего предшественника, К61-18 имеет защитный электрод. Этот электрод находится между экраным и низкопотенциальным электродами. Если на входе делителя амплитуда сигнала

превышает допустимое значение, то между высокопотенциальным и защитным электродами возникает электрический пробой. Последнее обстоятельство исключает попадание высокого напряжения на низкопотенциальный электрод и соответственно на вход измерительного прибора. ВЕДН типа ДНЕ1-4, ДНЕ1-5, укомплектованные К61-18 и конденсаторами переменной емкости [9], имеют номинальные коэффициенты деления $K_0 = 10000$, $K_0 = 2000$ и погрешности отклонения коэффициента деления от номинального значения $\delta = \pm 5\%$, $\delta = \pm 3\%$ соответственно. Кроме того, в конструкцию ДНЕ1-5 включен соединительный кабель длиной 5 м.

Дальнейшему расширению пределов рабочих напряжений препятствовало неравномерное распределение электрического поля вдоль диэлектрической части герметичной оболочки. Возможность повышения электрической прочности делителей при исключении роста габаритных размеров была показана в одной из расчетно-экспериментальных работ [10]. Выравнивание электрического поля достигалось рассредоточением проходной емкости вдоль оси симметрии высоковольтного плеча и введением системы рассеивающих электродов. Полученные результаты были применены в делителе типа ДНЕ1-6 [11]. ДНЕ1-6 имеет рабочее напряжение 200 кВ. Конструкция делителя отличалась от предыдущих наличием блоков, каждый из которых выдерживал испытательное напряжение 110 кВ (ампл. зн.). Делитель комплектовался коаксиальным кабелем длиной 20 м и имел основную погрешность коэффициента деления $\delta = \pm 1\%$.

Параллельно с работами по созданию делителей импульсных напряжений с участием автора проводились работы по созданию делителей высокочастотных напряжений [11, 12]. Делители предназначались для работы со стандартными вольтметрами или осциллографами. Снижение входной емкости до 3,0–3,5 пФ, обеспечение температурной нестабильности коэффициента передачи $\pm 0,02\%$ на 1°C , применение вместо стекла алюмооксидной керамики позволило поднять уровень рабочих напряжений до 25 кВ на частоте 30 МГц. Появление таких делителей решало задачу метрологического обеспечения производства вакуумных конденсаторов и вакуумных выключателей и переключателей. Диапазон рабочих частот был расширен сначала до 60 МГц (ДНЕ1-2), а позже до 90 МГц (ДНЕ1-3).

На рисунке 2 изображены вакуумные емкостные делители типов ДНЕ1-5 и ДНЕ1-2.

Математическая модель функции преобразования делителя напряжения представляется в виде [13]

$$K(j\omega) = K_0(1+k) \frac{1+j\omega\tau_2}{1+j\omega\tau_1} \frac{1}{1+j2\alpha\omega\tau_3 + (j\omega\tau_3)^2} e^{-j\omega\tau}, \quad (1)$$

где K_0 – номинальный коэффициент преобразования; τ – время задержки сигнала при его распространении от входа к выходу делителя; τ_1, τ_2 – постоянные времени плеч делителя; τ_3 – постоянная времени, связанная с минимальной резонансной частотой ω_p соотношением $\tau_3 = 1/\omega_p$; α – затухание, определяемое добротностью резонансного контура; k – коэффициент нагрузки, зависящий от частоты сигнала и амплитуды напряжения.



Рис. 2 Вакуумные емкостные делители напряжений

Условия независимости коэффициента передачи от частоты ω , получаемые из формулы (1):

1. Равенство постоянных времени плеч делителя $\tau_1 = \tau_2$.
2. Минимальная резонансная частота делителя должна быть больше верхней рабочей частоты $\omega \ll \omega_p$.

Каждое из плеч ВЕДН образовано емкостным $1/\omega C_i$ и индуктивными ωL_i сопротивлениями, активным сопротивлением электродов и выводов r_i , активным сопротивлением диэлектрической части оболочки и установочных элементов R_i [14]. Поскольку функция преобразования рассматривается в широком диапазоне частот, выделим области низких (до 1 МГц) и высоких частот (свыше 10 МГц). В указанных областях соблюдаются неравенства:

– для низких частот

$$\omega L_i, r_i \ll \frac{1}{\omega C_i} \leq R_i;$$

– для высоких частот

$$\omega L_i, r_i \leq \frac{1}{\omega C_i} \ll R_i.$$

Для RC-цепей, образующих плечи ВЕДН в области низких частот, выходное активное сопротивление ВЕДН значительно больше входного активного сопротивления измерительного прибора (нагрузки) $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$. Поэтому

$\tau_2 = (C_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{Н}}) \frac{R_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}}$ плеча низкого напряжения преобразуется к виду

$\tau_2 = R_{\text{Н}}(C_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{Н}})$, а относительное отклонение в области низких частот представляется выражением

$$\delta_{\text{Н}} = \frac{1}{2\omega^2\tau_2^2} 100\% .$$

На относительное отклонение $\delta_{\text{В}}$ коэффициента передачи в области частот, близких к верхней рабочей частоте, оказывают влияние резонансные свойства плеч и потери в металлической арматуре, определяющие добротности колебательных контуров. Например, при каскадном соединении П-образного и Г-образного четырехполюсников, замещающих ВЕДН типа ДНЕ1-2, относительное отклонение коэффициента передачи $\delta_{\text{В}} = \delta_{\text{В1}} + \delta_{\text{В2}}$ [14], где

$$\delta_{\text{В1}} = -\omega^2 \left[\frac{C_{2\Gamma}}{C_{2\Gamma} + C_{\text{Н}}} \left(\frac{1}{\omega_{3\Pi}^2} - \frac{1}{\omega_{1\Pi}^2} + \frac{1}{\omega_{2\Gamma}^2} - \frac{1}{\omega_{1\Gamma}^2} \right) \right] 100\% ;$$

$$\delta_{\text{В2}} = \omega^2 \left[\frac{C_{2\Gamma}}{C_{2\Gamma} + C_{\text{Н}}} \left(\tau_{3\Pi}^2 - \tau_{1\Pi}^2 + \tau_{2\Gamma}^2 - \tau_{1\Gamma}^2 \right) \right] 100\% .$$

Степень взаимной компенсации значений $\delta_{\text{В1}}$ и $\delta_{\text{В2}}$ определяется соотношением индуктивности L_i и активного сопротивления r_i элементов четырехполюсников, входящих соответственно в $\omega_i = \sqrt{L_i C_i}$ и $\tau_i = r_i L_i$. Необходимые значения L_i и r_i формируются в процессе конструирования делителей для конкретного диапазона частот. Для увеличения значения минимальной резонансной частоты $\omega_{\text{Р}}$ разработчиками ВЕДН использовалось многокаскадное построение ВЕДН и конденсаторы с переменными межэлектродными зазорами (неоднородная линия) [15, 16].

Температура перегрева ВЕДН в установившемся режиме описывается формулой [17]

$$\Delta T_{\text{y}} = B U^2 f^2 \sqrt{f} ,$$

где B – константа, зависящая от значения входной емкости, тепловых свойств делителя и условий эксплуатации; U – рабочее напряжение; f – частота, на которой производится измерение.

Относительное отклонение коэффициента преобразования от номинального значения, вызванное нагревом протекающим через делитель током, является одной из составляющих коэффициента нагрузки ($k \approx \delta_{U,f}$) и равно

$$\delta_{U,f} = \beta \Delta T_{\text{y}}$$

где β – температурная нестабильность коэффициента передачи.

Температура перегрева уменьшается с уменьшением входной емкости делителя, тангенса угла потерь конденсаторов, образующих делитель, и улучшением условий теплообмена.

Изложенные закономерности присущи всем типам разработанных ВЕДН импульсных и высокочастотных напряжений, основные параметры которых представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1
Вакуумные высоковольтные делительные конденсаторы

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Емкость, пФ		Входное сопротивление по постоянному току, Ом	Габариты, мм		Масса, кг
		входная	проходная		диаметр	высота	
К61-8, (ОЖО.465.026)	до 75	до 10	3,5	10^{10}	61	277	0,69
К61-18, (ОЖО.465.030)	до 100	до 10	3,0	10^{10}	105	290	1,8

Таблица 2
Вакуумные емкостные делители высокочастотных напряжений

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Коэффициент деления	Основная погрешность, %	Входная емкость, пФ	Диапазон рабочих частот, МГц	Габариты, мм		Масса, кг
						диаметр	высота	
ДНЕ1-2, (К61-19) ОЖО.273.006	1–25	1000	± 5	3,5	0,1–30	90	250	1,4
ДНЕ1-3, ОЖО.272.009	1–20	1000	± 5	3,0	1–60	90	221	1,2

Таблица 3
Вакуумные емкостные делители импульсных напряжений

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Коэффициент деления	Основная погрешность, %	Входная емкость, пФ	Диапазон рабочих частот, МГц	Габариты, мм		Масса, кг
						диаметр	высота	
ДНЕ1-1 (К61-17), ОЖО.465.025	3–75	1000	± 5	до 10	0,01–8,0	165	368	3,1
ДНЕ1-4, ОЖО.465.007	5–100	10000	± 5	до 10	0,01–4,0	180	400	4,5
ДНЕ1-5, ОЖО.272.010	5–100	2000	± 3	до 10	0,01–5,0	180	420	5,0
ДНЕ1-6 (КС-6), ОЖО.206.040	20–200	20000	± 1	до 15	0,04–5,0	380	800	36,0

Таким образом, использование вакуума в качестве основного диэлектрика в емкостных делителях позволяет создавать компактные средства измерений для ИИС и АСУ ТП на базе делителей импульсных напряжений до 300 кВ и высокочастотных (до 90 МГц) напряжений с амплитудой до 25 кВ (в перспективе до 50 кВ), превосходящие по основным эксплуатационным характеристикам средства измерений других классов.

Список литературы

1. **Шваб, А.** Измерения на высоком напряжении / А. Шваб ; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
2. **Fowkes W. R., Rowe R. M.** // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1966. – V. IM-15. – № 4. – P. 284.
3. ГОСТ 17512 – 82. Методы измерения при испытаниях на высоком напряжении.
4. **Воронов А. П.** // Электронная техника.– 1991. – Вып. 2 (83) – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
5. **Буц, В. П.** Вакуумные конденсаторы / В. П. Буц, М. Т. Железнов, М. М. Юринов. – Л. : Энергия, 1971.
6. **Воронов А. П., Смирнов Э. Н.** // Электронная промышленность. – 1995. – № 1. – С. 32.
7. **Смирнов Э. Н., Железнов М. Т.** // Электронная техника. – 1969. – Вып. 5. – С. 100. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
8. А. с. 260022 СССР / В. П. Буц, Э. Н. Смирнов, И. П. Тюрин // Бюл. изобрет. – 1970. – № 3.
9. А. с. 458045 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров, А. П. Воронов // Бюл. изобрет. – 1975. – № 3.
10. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Электронная техника. – 1992. – Вып. 1(86). – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
11. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Метрологическое обеспечение ИИС и АСУ ТП : тезисы докл. III Всесоюз. конф. – Львов : ВНИИМИУС, 1990. – С. 217.
12. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П., Купцова З. И.** // Электронная промышленность. – 1986. – № 2. – С. 31.
13. **Воронов А. П.** // Надежность и качество : труды Междунар. симпозиума. – Пенза, 2007. – 1 т. – С. 171.
14. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Электронная техника. – 1981. – Вып. 3(44). – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
15. А. с. 790030 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров // Бюл. изобрет. – 1980. – № 47.
16. А. с. 993403 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров // Бюл. изобрет. – 1983. – № 4.
17. **Воронов А. П.** // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза, 2006. – 1 т. – С. 397.