производить на потерю напряжения. Это будет иметь место при соблюдении условия $\frac{F}{F_э} \geqslant 1$, или, учитывая (4) и (5), когда

$$\Delta u_0 = \frac{\Delta u}{\sum_1^n l_i} \leqslant \frac{j_э I_{ср.}}{\gamma I_{э.кв.}}. \qquad (6)$$

В случае равномерно распределенной нагрузки условие (6) примет вид

$$\Delta u_0 \leqslant \frac{\sqrt{3} \cdot j_э}{2 \cdot \gamma}. \qquad (7)$$

Если учесть значения, рекомендуемые ПУЭ, то, используя (7), можно составить следующую таблицу:

Значения Δu_0 (*в/м*).

Тип и материал проводника	При использовании максимума нагрузки, *час*		
	до 3000	3—5000	более 5000
Голые провода медные	0,041	0,034	0,029
алюминиевые	0,035	0,030	0,029
В среднем	0,038	0,032	0,029
Кабели с бумажной изоляцией с жилами:			
медными	0,049	0,041	0,032
алюминиевыми	0,043	0,038	0,032
В среднем	0,046	0,039	0,032

Как видно из таблицы, Δu_0 мало зависит от материала провода. Поэтому практически можно пользоваться средними цифрами, чтобы в каждом отдельном случае решить, когда распределительную сеть следует рассчитывать на экономическую плотность тока либо на потерю напряжения.

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА РАБОТЫ И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ АМПЛИТУДНОГО КИЛОВОЛЬТМЕТРА

В. И. Гуль, О. И. Измайлов, Ю. П. Подосинкин

Измерение импульсных высоких напряжений представляет известные трудности, поэтому внедрение в лабораторную практику простых и надежных измерителей напряжения является полезным и ценным, особенно с методической точки зрения.

К числу простых устройств измерения напряжения относится [1] амплитудный вольтметр (пик-вольтметр), принципиальная схема которого показана на рис. 1 *а*.

Принципиальной схеме (рис. 1 *а*) с достаточной полнотой соответствует схема замещения (рис. 1 *б*).

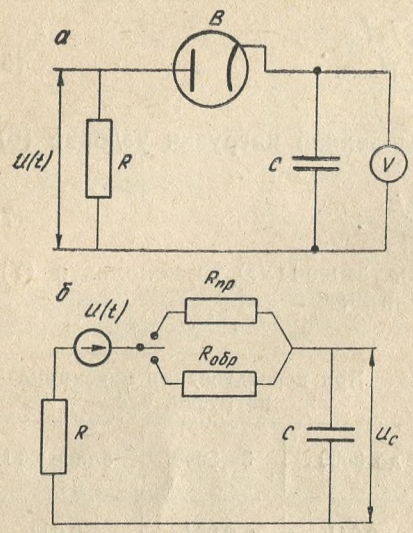

Рис. 1.

Предположим, что на входе схемы, т. е. на сопротивлении R источника измеряемого напряжения $u(t)$, возникает напряжение формы, показанной на рис. 2 *а*. При положительной полярности импульса вентиль B с момента $t \geqslant 0$ открыт и емкость C заряжается с постоянной времени:

$$\tau_з = (R + R_{пр})C, \qquad (1)$$

где $R_{пр}$ — сопротивление вентиля в проводящем (прямом) направлении.

В процессе заряда для одного фиксированного момента времени напряжение u_c на емкости C меньше напряжения u, причем это отличие возрастает при уменьшении отношения $\tau_ф/\tau_з$.

Изменение во времени напряжения u_c показывает пунктирная кривая на рис. 2 *а*. Очевидно, чтобы напряжение $u_{cм}$ возможно мало отличалось от напряжения $u_м$, необходимо выдержать сильное неравенство:

$$\tau_ф \gg \tau_з. \qquad (2)$$

К моменту t_1 напряжения u и u_c уравниваются и при $t \geqslant t_1$ вентиль B оказывается запертым, т. е. в цепь включается весьма большое сопротивление $R_{обр}$. Обозначим постоянную времени саморазряда емкости C как

$$\tau_р = C(R_{обр} + R). \qquad (3)$$

Для надежного отсчета показаний по шкале электростатического вольтметра, который измеряет напряжение на емкости C, требуется некоторое время $\tau_{отсчета}$. Напряжение u_c за время $\tau_{отсчета}$ не должно существенно уменьшиться вследствие саморазряда емкости C. Это требование выражается неравенством

$$\tau_р \gg \tau_{отсчета}. \qquad (4)$$

Из изложенного выше качественного анализа следует, что для правильного измерения амплитуд импульсов напряжения необходимо:

а) уменьшать время заряда $\tau_з$;

б) увеличивать время саморазряда $\tau_р$.

Кроме этих двух соображений при реализации схемы учитывается следующее:

в) собственная емкость электростатического вольтметра, которая изменяется при его работе вследствие взаимного перемещения пластин-электродов, должна составлять пренебрежимо малую часть постоянной емкости C;

г) внутреннее сопротивление R источника напряжения должно быть возможно малым, чтобы не увеличивать $\tau_з$.

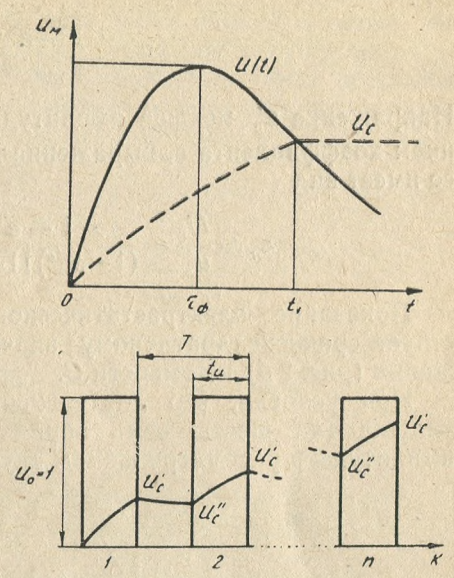

Рис. 2.

С учетом указанных требований для использования в качестве вентиля наиболее подходящим оказывается кенотрон (вакуумный диод); вентили газонаполненные и полупроводниковые обладают небольшим сопротивлением $R_{пр}$ и сравнительно низким сопротивлением $R_{обр}$ — последнее весьма ограничивает использование таких вентилей в схемах простых пик-вольтметров.

Для конкретной схемы пик-вольметра в соответствии с условиями (2) и (4) существует определенная минимальная длительность фронта $\tau_ф$ одиночного импульса, амплитуда которого может быть измерена с заданной погрешностью.

На практике в ряде случаев достаточно оценить среднюю величину амплитуды серии периодически повторяющихся примерно одинаковых по форме и величине импульсов. Такая оценка также возможна с помощью пик-вольтметра. При этом минимальная длительность $\tau_ф$ импульсов в серии оказывается значительно меньше, чем в случае измерения с той же погрешностью одиночного импульса.

Рассмотрим случай воздействия на схему серии прямоугольных импульсов единичной амплитуды ($U_0=1$) с длительностью $t_и$ и периодом повторения T (рис. 2 *б*). Анализ показал, что напряжение на емкости C к моменту окончания n-го импульса составляет:

$$u_c' = (1 - e^{-\alpha})\left[1 + e^{-(\alpha+\beta)} + e^{-2(\alpha+\beta)} + \ldots + e^{-n(\alpha+\beta)}\right], \qquad (5)$$

где $\alpha = \dfrac{t_и}{\tau_з}$; $\beta = \dfrac{T - t_и}{\tau_р}$.

В установившемся режиме ($n \to \infty$) сумма ряда (5) согласно [2] равна

$$u_c' = \frac{1 - e^{-\alpha}}{1 - e^{-(\alpha+\beta)}}. \qquad (6)$$

Напряжение u_c' меньше амплитуды U_0, что учитывается введением коэффициента ε, выражение для которого при n-м импульсе имеет вид

$$\varepsilon_n = \frac{U_0}{u_c'} = \frac{1 - e^{-(\alpha+\beta)}}{(1 - e^{-\alpha})\left[1 - e^{-n(\alpha+\beta)}\right]}. \qquad (7)$$

Показание электростатического вольтметра U_v соответствует среднеквадратичному значению пульсирующего напряжения (рис. 2 *б*) на емкости C.

При условии, что длительность импульса $t_и$ значительно меньше (на шесть—семь порядков) времени T, коэффициент амплитуды в рассматриваемом случае выражается

$$k_a = \frac{u_c'}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2\beta}(1 - e^{-2\beta})}}. \qquad (8)$$

Коэффициент амплитуды k_a не зависит от числа импульсов n.

Таким образом, по показаниям вольтметра U_v, в случае измерения серии аналогичных периодических импульсов амплитуду U_0 следует определить как:

$$U_0 = U_v k_a \varepsilon. \qquad (9)$$

Анализ выражений (6), (7), (8) подтверждает необходимость выполнения условий (2), (4) и пунктов а) — в), с учетом которых производился выбор параметров элементов схемы амплитудного вольтметра.

Схема для измерения импульсных напряжений с амплитудой до 10 *кв* и минимальной длительностью (в режиме периодического повторения) порядка 1 *мксек* имеет элементы, рассмотренные ниже.

Кенотрон типа ВІ-0,1/40 с накальным изолирующим трансформатором. Для этого кенотрона при импульсных напряжениях экспериментально определены зависимости прямого сопротивления $R_{пр}$ и сопротивления запертого вентиля $R_{обр}$ от напряжения накала. Результирующие графики $\frac{R_{пр}}{R_{обр}} = f\left(\frac{U_{накала}}{U_{нак.ном.}}\right)$ показаны на рис. 3.

Ход кривой графика (рис. 3) показывает, что наименьшее соотношение $R_{пр}/R_{обр}$ имеет место при $u_{накала} = 0{,}65\, U_{ном}$.

Этот режим накала принят как исходный и для него $R_{обр}=25\cdot10^8$ *ком*; $R_{пр}=27$ *ком*.

Высоковольтная емкость C типа ПСО имеет величину порядка 190 *пкф*; собственная емкость электростатического вольтметра С-96 не превышает 12 *пкф*; вследствие чего изменение этой емкости при работе киловольтметра практически не сказы-

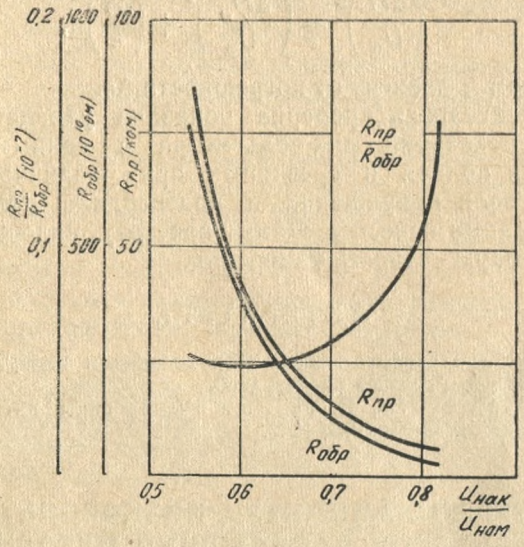

Рис. 3.

вается на суммарной величине емкости, принятой равной $C=200$ *пкф*.

Сопротивление источника измеряемого напряжения $R \cong$ $\cong$ 100—150 *ом* и по сравнению с сопротивлениями вентиля $R_{пр}$ и $R_{обр}$ сопротивлением R можно пренебречь.

Постоянные времени по выражениям (1) и (3) составляют

$$\tau_з = 5{,}4 \text{ мксек}; \ \tau_р = 500 \text{ сек}.$$

Расчеты по формуле (8) для найденных $\tau_з$ и $\tau_р$ при $T=4\div10$ *сек* дают с высокой точностью:

$$k_a = 1.$$

Коэффициент ε зависит, как это следует из выражения (7), от $t_и$, T, $\tau_з$, $\tau_р$ и числа импульсов n.

Для $t_и \geqslant 0{,}75$ *мксек* и $T \leqslant 6$ *сек* при $n \geqslant 30$ согласно выражению (7) $\varepsilon=1{,}05\pm\Delta\varepsilon=1{,}05\pm0{,}04$; при $t_и > 1{,}5$ *мксек* $\varepsilon \cong 1{,}0$.

Соответствующие расчеты показывают, что погрешности ε одинаковы для случая прямоугольных импульсов и случая косоугольных импульсов с длительностью $t=1{,}5\,t_и$ при прочих оди-

наковых условиях. В свою очередь косоугольный импульс и импульс с экспоненциальным фронтом для требуемых измерений примерно равнозначны.

Результирующая погрешность измерения γ для случая воздействия на схему аналогичных повторяющихся импульсов представляется как:

$$\gamma^2 = \left(\frac{\Delta U}{U_0}\right)^2 = \left(\frac{\Delta U_v}{U_v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2,$$

т. е. в основном γ зависит от погрешности $\Delta\varepsilon$.

Экспериментальная проверка показала удовлетворительное совпадение показаний пик-вольтметра с данными осциллографирования полной и срезанных при различных временах импульсных волн напряжения и подтвердила положительные эксплуатационные качества схемы: простоту, надежность и достаточно высокую точность измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. Под ред. проф. А. А. Воробьева. Госэнергоиздат, 1960.

2. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Физматгиз, 1962.

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ МАГНИТОЗАПИСИ

В. И. Гуль, О. И. Измайлов, Ю. П. Подосинкин

Одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность электроснабжения, является выбор оптимальной токо-временной уставки защиты; особое значение приобретает этот фактор в условиях эксплуатации мощных заводских потребителей постоянного тока, в частности, двигателей кранов, станов и т. п. Для получения статистических данных следует выполнять в течение длительного времени регистрацию максимальных токов в данной сети. Такая регистрация возможна путем записи падений напряжения на токовых шунтах, для чего могут быть использованы известные методы автоматической регистрации внутренних перенапряжений [1], или путем измерения максимальной напряженности магнитного поля искомого тока методом магнитозаписи.

Метод магнитозаписи имеет ряд положительных качеств, таких как простота эксплуатации и удовлетворительная результирующая точность. Однако для расшифровки магнитозаписи необходимо точно знать количественное соотношение k между