

УДК 621.373.5

**М.И.БАРАНОВ**, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.В.ЛЕДЕНЕВ**, канд.техн.наук, доцент, НТУ «ХПИ»;  
**А.С.СВИЧКАРЬ**, магистр, НТУ «ХПИ»

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
 ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА 1 МВ**

Наведено результати теоретичного дослідження передатних властивостей омичного подільника на пруги типу ОПН-1 на номінальну напругу 1 МВ.

The results of theoretical investigation of transferring properties of ohmic voltage divider of ODN-1 type on nominal voltage of 1 MV are given.

**Введение**

В [1,2] была описана конструкция омического делителя напряжения на номинальное напряжение 1 МВ (ОДН-1). Данный делитель состоит из высоковольтного и низковольтного плеч, двух экранов, изоляционной несущей конструкции и металлического основания-шасси. Экран, расположенный в верхней части делителя, состоит из двух торов диаметром 0,38 м и 0,99 м, которые расположены на расстоянии 0,54 м друг от друга и улучшают распределение электрического напряжения по высоте делителя. Экран, расположенный в нижней части делителя, представляет собой тор диаметром 0,85 м, предназначенный для создания распределенного потенциала земли в нижней части делителя. Изоляционная несущая конструкция делителя ОДН-1 состоит из четырех стеклопластиковых труб типа ТСПО длиной 0,652 м с внешним диаметром 0,12 м. В середине каждой стеклопластиковой трубы расположено 50 керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом, которые размещены на гетинаксовых пластинах длиной 0,633 м. Данные резисторы представляют собой высоковольтное плечо (ВП) делителя ОДН-1. Низковольтное плечо (НП) делителя ОДН-1 представляет собой два параллельно соединенных резистора типа МЛТ-2-1,8 Ом [1,2]. Общая высота омического делителя напряжения типа ОДН-1 составляет 3,02 м. Кроме того, в [1,2] были приведены результаты экспериментальных исследований данного высоковольтного делителя импульсного напряжения. Из проведенных с участием авторов экспериментов следует, что с помощью делителя ОДН-1 возможно надежно регистрировать аперiodические и синусоидальные испытательные импульсы микро- и миллисекундной длительности в сотни кВ, подаваемые на объект электрических испытаний. Определенный теоретический и практический интерес представляет задача, связанная с математическим исследованием передаточных свойств высоковольтного делителя импульсного напряжения типа ОДН-1.

**1. Расчет паразитных электрических параметров омического делителя напряжения ОДН-1.** Паразитными электрическими параметрами делителей напряжения, в том числе и омического делителя ОДН-1, как известно, являются [3]: его продольная емкость  $C_p$ , емкость относительно земли  $C_3$  и индуктивность  $L$ .

**Оценка емкостей делителя ОДН-1.** Емкость относительно земли  $C_3$  в исследуемом делителе ОДН-1 может быть приближенно рассчитана по следующей формуле [3]:

$$C_3 = \frac{2pe l_d}{\ln(2l_d/\sqrt{3}d_d)}, \tag{1}$$

где  $l_d$  – длина ОДН-1 ( $l_d = 3,02$  м);  $d_d$  – диаметр ОДН-1 ( $d_d = 0,12$  м).

Рассчитав  $C_3$  по (1), получаем, что она в рассматриваемом электротехническом случае численно составляет  $4,5 \cdot 10^{-11}$  Ф. Продольную емкость  $C_p$  делителя ОДН-1 рассчитаем по формуле, приведенной в [4]:

$$C_p = \frac{4e_0 a}{1 - \frac{2a}{pl_s} \left[ 1 - \frac{7}{12} \left( \frac{a}{l_s} \right)^2 + \frac{33}{40} \left( \frac{a}{l_s} \right)^4 \right]}, \tag{2}$$

где  $a$  – радиус верхнего экрана делителя ( $a = 0,495$  м);  $l_s$  – расстояние от верхнего экрана делителя до земли ( $l_s = 2,61$  м).

С учетом (2) имеем, что  $C_p = 1,98 \cdot 10^{-11}$  Ф. Из [3] известно, что для равномерного распределения напряжения по длине делителя напряжения должно выполняться неравенство  $C_p/C_3 \geq 3$ . Так как данный делитель не имеет дополнительной продольной емкости  $C'_{pq}$ , то из уравнения  $C_1 = C'_{pq} + C_p$  следует, что  $C_1 = C_p$ , где  $C_1$  – емкость ВП делителя [3]. Используя приведенные выше количественные расчеты, оценим степень равномерности распределения напряжения по длине делителя. В качестве ее показателя используем соотношение  $C_p/C_3$ , которое в нашем случае численно составит 0,442.

**Оценка индуктивности делителя ОДН-1.** Индуктивность ВП делителя ОДН-1 существенно превышает индуктивность его НП из-за большого количества последовательно включенных керамических резисторов, содержащихся в его ВП. Следовательно, индуктивностью НП можно прктически пренебречь. Определим количественно индуктивность  $L$  ВП делителя типа ОДН-1. В [1,2] отмечено, что керамические резисторы в ВП размещены «елочкой» на гетинаксовых пластинах. Расчет индуктивности делителя при размещении резисторов в ВП «елочкой» является весьма трудоемкой задачей. Поэтому проведем приближенный расчет индуктивности  $L$  данного делителя.

При расчетах искомой индуктивности  $L$  делителя ОДН-1 представим каждый его резистор в виде прямолинейного отрезка металлического провода соответствующей длины (эквивалента резистора). Диаметр провода пусть будет

равен диаметру вывода резистора. Это можно допустить, так как внутри керамический резистор типа ТВО-5-100 Ом представляет собой графитовый стержень, равный по диаметру соответствующему размеру круглого металлического вывода данного резистора. Общую длину резистора с выводами примем равной 100 мм, из которой 77 мм составляет керамическое тело самого резистора и по 11,5 мм каждый из проволочных выводов резистора.

Индуктивность  $L$  делителя ОДН-1 найдем как среднее значение между индуктивностью при размещении резисторов его ВП в виде бифиляра  $L_b$  (бифилярная намотка провода) и индуктивностью при размещении всех резисторов делителя в виде прямой линии  $L_{nl}$ .

Индуктивность  $L_b$  рассчитаем по приведенной ниже формуле [5]:

$$L_b = \frac{m_0 l_b}{2p} \operatorname{Arch} \left( \frac{a}{d_p} \right), \quad (3)$$

где  $l_b$  – общая длина резисторов с соединительными между ними проводниками ( $l_b = 22,156$  м);  $d_p$  – диаметр проволочного вывода резистора ( $d_p = 0,001$  м);  $a$  – расстояния между продольными осями соседних керамических резисторов ( $a = 0,011$  м).

Длина проводов эквивалентов резисторов была рассчитана из следующих соображений: на гетинаксовой пластине длиной 0,633 м размещается 50 резисторов типа ТВО-5-100. Размеры каждого резистора составляют 12x8x77 мм. Если резисторы на пластине расположить параллельно друг другу (имитировать бифилярную намотку провода) равномерно по всей длине пластины, то расстояние между графитовыми стержнями соседних резисторов окажется равным 11 мм. Как указывалось выше, длина резистора с выводами равна 100 мм. При размещении резисторов параллельно друг другу для их последовательного соединения необходимо 49 соединительных проводников длиной 0,011 м. Учитывая вышеизложенное, рассчитаем длину провода одной секции  $l_C$  ВП делителя по выражению:  $l_C = 50 \cdot 0,1 + (49 \cdot 0,011) = 5,539$  м. Общая длина рассматриваемых проводов для четырех секций ВП делителя будет равна  $l = 4l_C = 22,156$  м. Таким образом, искомая индуктивность  $L_b = 13,7$  мкГн.

При размещении всех керамических резисторов делителя ОДН-1 в виде прямой линии индуктивность  $L_{nl}$  рассчитаем по формуле [5]:

$$L_{nl} = \frac{m_0 l_{nl}}{2p} \left( \ln \frac{2l_{nl}}{r} - 1 \right), \quad (4)$$

где  $r$  – радиус провода ( $r = 0,0005$  м);  $l_{nl}$  – общая длина резисторов ( $l_{nl} = 20$  м).

Тогда имеем, что  $L_{nl} = 41,2$  мкГн. Количественно оценим индуктивность  $L$  делителя по формуле:  $L = (L_b + L_{nl})/2$ . Следовательно,  $L = 27,45$  мкГн.

**2. Расчет переходной характеристики омического делителя напряжения ОДН-1.** Исследуем передаточные свойства делителя напряжения типа ОДН-1, которые можно описать с помощью его нормированной переходной характеристикой (НПХ). При теоретическом исследовании НПХ на вход ОДН-

1 будем подавать сигнал в виде единичного скачка напряжения (единичной функции Хевисайда) [3]. Для исследования НПХ в виде  $g(t) = U_2(t) \cdot k/U_1(t)$ , где  $k$  – коэффициент деления делителя, равный  $k = (R_1 + R_2)/R_2 = 22220$  [1], воспользуемся упрощенной схемой замещения ОДН-1. Данная схема для делителя ОДН-1 может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1 [3].

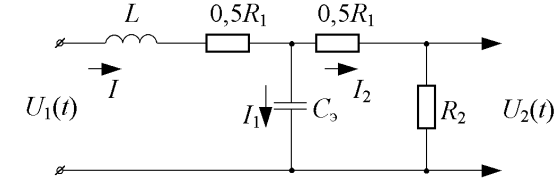


Рисунок 1 – Упрощенная схема замещения омического делителя напряжения ОДН – 1

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $R_1$  – активное сопротивление ВП делителя;  $R_2$  – активное сопротивление НП делителя;  $L$  – индуктивность ВП делителя;  $C_3$  – эквивалентная емкость делителя. Расчет НПХ будем проводить при подаче на вход омического делителя ОДН-1 импульса напряжения в виде единичной ступенчатой функции Хевисайда, имеющей следующий вид [3]:

$$U_1(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Эквивалентную емкость  $C_3$  омического делителя высокого напряжения ОДН-1 рассчитаем по следующей формуле [3]:

$$C_3 = 0,43 \cdot C_3. \quad (6)$$

Из (6) следует, что исследуемом случае  $C_3 = 1,935 \cdot 10^{-11}$  Ф. Далее запишем в операторной форме по Лапласу для упрощенной схемы замещения рассматриваемого делителя напряжения систему уравнений, описывающих электромагнитные процессы в омическом делителе ОДН-1:

$$\begin{cases} pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + \frac{1}{pC_3} I_1(p) = U_1(p); \\ pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I_2(p) + R_2 \cdot I_2(p) = U_1(p); \\ I(p) = I_1(p) + I_2(p). \end{cases} \quad (7)$$

Величину тока, протекающего через резистор  $R_2$  схемы на рис. 1, определим по следующей формуле:

$$I_2(p) = I(p) \cdot \frac{\frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_3}}. \quad (8)$$

Общий ток  $I(p)$  в (8) определим из следующего операторного выражения:

$$I(p) = \frac{U_1(p)}{pL + 0,5R_1 + \frac{(0,5R_1 + R_2) \cdot \frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_3}}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что ток  $I_2(p)$  через резистор  $R_2$  будет иметь вид:

$$I_2(p) = \frac{U_1(p)}{pC_3 \cdot (pL + 0,5R_1) \cdot \left(0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_3}\right) + 0,5R_1 + R_2}. \quad (10)$$

Напряжение на резисторе  $R_2$  представим как:

$$U_2(p) = \frac{R_2 \cdot U_1(p)}{pC_3 \cdot (pL + 0,5R_1) \cdot \left(0,5R_1 + R_2 + \frac{1}{pC_3}\right) + 0,5R_1 + R_2} = \frac{4R_2 \cdot U_1(p)}{2LC_3(R_1 + 2R_2)p^2 + (4L + C_3R_1(R_1 + 2R_2))p + 4(R_1 + R_2)}. \quad (11)$$

Операторное изображение выходного напряжения  $U_2(p)$  согласно (11) можно представить в следующем компактном виде:

$$U_2(p) = \frac{4R_2 \cdot U_1(p)}{ap^2 + bp + c}, \quad (12)$$

где  $U_1(p) = 1/p$  – изображение единичного скачка напряжения на входе делителя ОДН–1;  $a = 2LC_3(R_1 + 2R_2)$ ;  $b = 4L + C_3R_1(R_1 + 2R_2)$ ;  $c = 4(R_1 + R_2)$ .

Оригинал выходного напряжения  $U_2(t)$  найдем при помощи теоремы разложения [6]. Для этого представим выражение для  $U_2(p)$  в виде:

$$U_2(p) = \frac{f_1(p)}{p \cdot f_2(p)}, \quad (13)$$

где  $f_1(p) = 4R_2$ ;  $f_2(p)$  – функция, отображающая характеристическое уравнение, имеющее следующий вид  $f_2(p) = ap^2 + bp + c$ .

Так как один из корней знаменателя в выражении (13) для  $U_2(p)$  является нулевым, то оригинал выходного напряжения  $U_2(t)$  будет иметь следующий аналитический вид:

$$U_2(t) = \frac{f_1(0)}{f_2(0)} + \sum_{i=1}^2 \frac{f_1(p_i)}{p \cdot f_2'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (14)$$

где  $p_i$  – корни характеристического уравнения вида  $f_2(p) = ap^2 + bp + c$ .

Корни характеристического уравнения вида  $f_2(p)$  в (13) равны:

$$p_1 = -\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad p_2 = -\frac{b}{2a} - \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (15)$$

Из (13) и (15) видно, что значения числителя и производной знаменателя для оригинала выходного напряжения  $U_2(t)$  имеют вид:

$$f_1(0) = 4R_2; \quad (16)$$

$$f_2(0) = 4(R_1 + R_2); \quad (17)$$

$$f_1(p_1) = 4R_2; \quad (18)$$

$$f_2'(p_1) = \frac{b^2 - 4ac - b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad (19)$$

$$f_1(p_2) = 4R_2; \quad (20)$$

$$f_2'(p_2) = \frac{b^2 - 4ac + b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (21)$$

Тогда, оригинал напряжения  $U_2(t)$  на выходе делителя ОДН–1, при подаче на его вход единичного скачка напряжения  $U_1(t) = l(t)$ , имеет вид:

$$U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{8R_2 \cdot a}{b^2 - 4ac - b\sqrt{b^2 - 4ac}} \exp\left[\left(-\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)t\right] + \frac{8R_2 \cdot a}{b^2 - 4ac + b\sqrt{b^2 - 4ac}} \exp\left[-\left(\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)t\right]. \quad (22)$$

Из (22) следует, что в предельном случае  $\lim_{t \rightarrow 0} U_2(t) = 0$  и  $\lim_{t \rightarrow \infty} U_2(t) = 1/k$ .

В дальнейшем используем следующие электрические параметры исследуемого делителя ОДН–1:  $R_1 = 20$  кОм;  $R_2 = 0,9$  Ом;  $C_3 = 1,935 \cdot 10^{-11}$  Ф;  $L = 27,45$  мкГн;  $a = 2,1248 \cdot 10^{-11}$  Ом·с<sup>2</sup>;  $b = 7,85 \cdot 10^{-3}$  Ом·с;  $c = 80003,6$  Ом. При указанных параметрах получим оригинал выходного напряжения  $U_2(t)$  в виде:

$$U_2(t) = 4,5 \cdot 10^{-5} + 0,1354 \cdot 10^{-5} e^{-3,59 \cdot 10^8 t} - 4,635 \cdot 10^{-5} e^{-1,049 \cdot 10^7 t}. \quad (23)$$

В результате для НПХ исследуемого омического делителя напряжения ОДН–1, представленной нами соотношением  $g(t) = U_2(t) \cdot k/U_1(t)$ , может быть построена кривая, приведенная в безразмерном виде на рис. 2.

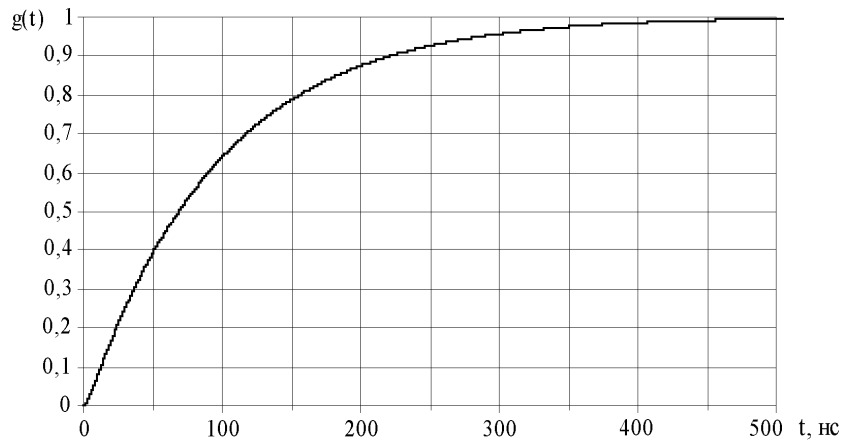


Рисунок 2. НПХ для омического делителя напряжения ОДН-1

Из расчетной кривой НПХ, представленной на рис. 2, следует, что собственное время нарастания НПХ (время, в течение которого численное значение НПХ изменяется между уровнями 0,1–0,9 от своего максимального значения), для исследуемого высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-1 составляет примерно 209 нс.

Известно, что для достоверной и надежной регистрации быстроизменяющихся импульсов напряжения необходимо, чтобы собственное время нарастания измерительного прибора было на порядок меньше времени нарастания измеряемого импульсного сигнала [3]. Таким образом, с помощью рассматриваемого высоковольтного омического делителя напряжения ОДН-1, созданного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в отделе электромагнитных испытаний, можно уверенно регистрировать испытательные импульсы напряжения микро- и миллисекундной длительности. Отметим, что эти расчетные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований омического делителя напряжения ОДН-1, которые приведены в [1,2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведен приближенный расчет паразитных электрических параметров высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-1 на номинальное входное напряжение 1 МВ. Из выполненных расчетов следует, что емкость относительно земли  $C_3$  в делителе ОДН-1 составляет  $4,5 \cdot 10^{-11}$  Ф, а продольная емкость исследуемого делителя  $C_p$  равна  $1,98 \cdot 10^{-11}$  Ф. При определении полной индуктивности делителя ОДН-1 индуктивностью его НП можно пренебрегать. Определение паразитной индуктивности при расположении керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в его ВП «елочкой» является весьма трудоемкой задачей. Поэтому индуктивность ВП исследуемого делителя можно опре-

делять как среднее арифметическое между индуктивностями при расположении его керамических резисторов типа ТВО-5-100 Ом в ВП в виде бифиляра и в виде прямолинейных отрезков металлического проводника соответствующих геометрических размеров. С учетом такого приближенного подхода расчетное значение индуктивности  $L$  высокоомного делителя напряжения типа ОДН-1 численно составляет 27,45 мкГн.

2. Расчетное собственное время нарастания НПХ высоковольтного омического делителя напряжения типа ОДН-1 равно около 209 нс.

3. Исследуемый высоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-1 может быть использован в качестве рабочего измерительного средства при измерении в лабораторных условиях быстро изменяющихся апериодических и синусоидальных импульсов напряжения микро- и миллисекундной длительности с уровнем амплитуды до 1 МВ.

**Список литературы:** 1. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зиньковский В.М. и др. Омический делитель напряжения для измерения испытательных грозовых и коммутационных импульсов амплитудой до 1 МВ // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 20-30. 2. Баранов М.И., Свічкарь О.С. Електрофізичні особливості розробки і створення високоомного подільника напруги на 1 МВ // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (4 – 6 червня 2008 р., м. Харків). – ч. 2, Харків: НТУ «ХПИ», 2008. – С. 342. 3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 4. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с. 5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с. 6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2009

УДК 621.3:537.3

**М.И.БАРАНОВ**, докт.техн.наук, главн.науч.сотр., НТУ «ХПИ»;  
**В.О.ЛЫСЕНКО**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## ПРИБЛИЖЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРЯМОГО УДАРА В НЕЕ ЛИНЕЙНОЙ МОЛНИИ

Надані дві спрощені розрахункові електродинамічні моделі руйнування деревини і результати наближеного оцінювання за ними механічного напруженого стану деревини сосни, яка зазнає прямий удар лінійної блискавки та подовжене розповсюдження нею сильнотемпературного низькотемпературного плазмового каналу. Показано, що електродинамічна дія лінійної блискавки на вказану деревину може приводити до її механічного радіального розколювання.