

М.И.БАРАНОВ, докт. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;

В.В.ЛЕДЕНЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;

А.С.СВИЧКАРЬ, магистр, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛУЧШЕНИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОМИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА 1 МВ

Наведено результати досліджень по поліпшенню передатних властивостей омичного подільника напруги на 1 МВ типу ОПН-1 на основі використання в його низьковольтному плечі $R_K C_K$ -ланцюжка, що коректує, і індуктивності L_K , що коректує.

The results of researches are presented on the improvement of transmission properties of Ohm-divisor of voltage on 1 MV of type ODV-1 on the basis of the use in his low-voltage shoulder of correcting $R_K C_K$ -chainlets and correcting inductance L_K .

Введение. В [1–4] были представлены конструкция и приближенные расчеты по выбору параметров основных элементов омического делителя напряжения на рабочее напряжение до 1 МВ (ОДН-1). Там же был описан один метод расчета передаточных свойств данного делителя, в том числе его нормированной переходной характеристики (НПХ). Из расчетов согласно [4] следует, что собственное время нарастания НПХ делителя ОДН-1 составляет около 209 нс. Данное время нарастания НПХ совпадает с результатами экспериментальных исследований делителя ОДН-1, проведенных авторами. Время нарастания НПХ делителя ОДН-1 в 209 нс приемлемо для измерения с его помощью импульсов напряжения длительностью фронта не менее 1 мкс. При использовании делителя ОДН-1 для измерения импульсов напряжения с более короткими фронтами погрешность их регистрации становится большой, что приводит к низкой и неприемлимой на практике достоверности получаемых результатов. Для решения этой электрофизической задачи необходимо уменьшать собственное время нарастания НПХ для делителя ОДН-1. Из [5] известны некоторые методы улучшения НПХ для омических делителей напряжения: во-первых, подключение параллельно низковольтному плечу делителя (НПД) корректирующей $R_K C_K$ -цепочки; во-вторых, включение корректирующей индуктивности L_K последовательно с их НПД. В дальнейшем рассмотрим каждый из этих методов улучшения НПХ для делителя ОДН-1.

1. Расчет НПХ делителя ОДН-1 при использовании корректирующей $R_K C_K$ -цепочки. Для расчета НПХ делителя ОДН-1 необходимо знать его паразитные электрические параметры: продольную емкость C_P , емкость относительно земли C_3 и индуктивность L . Согласно [4], примем, что указан-

ные паразитные параметры делителя ОДН–1 составляют следующие численные значения: $C_p = 1,988 \cdot 10^{-11}$ Ф, $C_3 = 4,5 \cdot 10^{-11}$ Ф и $L = 27,45$ мкГн.

Исследуем первый способ возможного улучшения НПХ для делителя ОДН–1, основанный на включении корректирующей $R_K C_K$ -цепочки параллельно резистору R_2 его НПД. При указанном включении корректирующей $R_K C_K$ -цепочки в цепи НПД упрощенная схема замещения делителя ОДН–1 будет иметь вид, представленный на рис. 1.

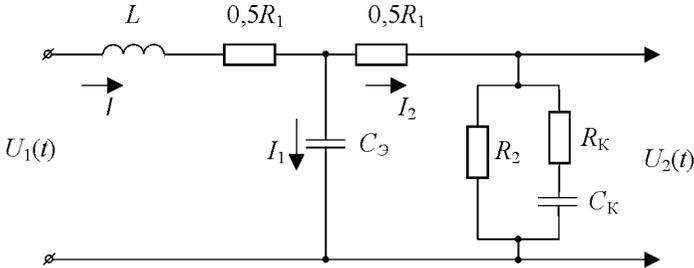


Рисунок 1 – Упрощенная схема замещения делителя ОДН–1 с использованием в его НПД корректирующей $R_K C_K$ -цепочки

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_1 – активное сопротивление высоковольтного плеча делителя (ВПД); R_2 – активное сопротивление НПД; R_K – активное сопротивление корректирующей цепочки; C_K – емкость корректирующей цепочки; L – индуктивность ВПД и НПД; C_3 – эквивалентная емкость делителя ОДН–1; I , I_1 и I_2 – токи в цепях делителя ОДН–1.

Для исследования НПХ на вход исследуемого делителя ОДН–1 будем подавать импульс напряжения в виде единичной ступенчатой функции Хевисайда, которая имеет следующий известный вид [3,4]:

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

Эквивалентную емкость C_3 для делителя ОДН–1 согласно [4] примем равной $1,935 \cdot 10^{-11}$ Ф, так как рассматриваемая здесь конструкция делителя ОДН–1 по сравнению с вариантом его исполнения, представленным в [4], не изменилась. Далее запишем в операторной форме по Лапласу для упрощенной электрической схемы замещения делителя ОДН–1, приведенной на рис. 1, систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в исследуемом делителе напряжения типа ОДН–1:

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

$$I(p) = I_1(p) + I_2(p). \quad (2)$$

Изображение тока $I_2(p)$ через НПД делителя ОДН–1 с параллельно включенной его активному сопротивлению R_2 согласно рис. 1 $R_K C_K$ -цепочкой определим по следующей формуле:

$$I_2(p) = I(p) \cdot \frac{\frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + \frac{R_2 R_K pC_K + R_2}{(R_2 + R_K)pC_K + 1} + \frac{1}{pC_3}}. \quad (3)$$

Изображение полного тока $I(p)$ определим из следующего выражения:

$$I(p) = \frac{U_1(p)}{pL + 0,5R_1 + \frac{\left(0,5R_1 + \frac{R_2 R_K pC_K + R_2}{(R_2 + R_K)pC_K + 1}\right) \cdot \frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + \frac{R_2 R_K pC_K + R_2}{(R_2 + R_K)pC_K + 1} + \frac{1}{pC_3}}. \quad (4)$$

Следовательно, изображение тока через НПД с включенной параллельно его активному сопротивлению R_2 $R_K C_K$ -цепочкой будет иметь вид:

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

Тогда для изображения напряжения $U_2(p)$ на выходе ОДН–1 запишем:

$$U_2(p) = \frac{(4R_2 + 4C_K R_K R_2 p) \cdot U_1(p)}{ap^3 + bp^2 + cp + d}, \quad (6)$$

где $U_1(p) = p^{-1}$ – изображение единичного скачка напряжения на входе омического делителя ОДН–1;

$$a = 2C_3 L R_1 (R_2 + R_K) C_K + 4C_3 L R_2 C_K R_K;$$

$$b = 2C_3 L R_1 + 4C_3 L R_2 + (4L + C_3 R_1^2)(R_2 + R_K) C_K + 2C_3 R_1 R_2 C_K R_K;$$

$$c = 4L + C_3 R_1^2 + 2C_3 R_1 R_2 + 4R_1 (R_2 + R_K) C_K + 4R_2 C_K R_K;$$

$$d = 4(R_1 + R_2).$$

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

$$U_2(p) = \frac{f_1(p)}{p \cdot f_2(p)}, \quad (7)$$

где $f_1(p) = 4R_2 + 4C_K R_K R_2 p$; $f_2(p) = ap^3 + bp^2 + cp + d$.

Так как один из корней знаменателя в (7) для $U_2(p)$ является нулевым, то оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ будет иметь следующий вид:

$$U_2(t) = \frac{f_1(0)}{f_2(0)} + \sum_{i=1}^3 \frac{f_1(p_i)}{p \cdot f_2'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (8)$$

где p_i – корни характеристического уравнения $f_2(p) = 0$.

Далее при помощи программного пакета MathCad 14 [7] найдем корни характеристического уравнения $f_2(p) = 0$. Для этого используем следующие электрические параметры исследуемого делителя ОДН–1 [4]: $R_1 = 20$ кОм; $R_2 = 0,9$ Ом; $C_3 = 1,935 \cdot 10^{-11}$ Ф; $L = 27,45$ мкГн; $R_K = 33$ Ом, $C_K = 3,3 \cdot 10^{-9}$ Ф; $a = 2,8547 \cdot 10^{-18}$ Ом·с³; $b = 9,024 \cdot 10^{-10}$ Ом·с²; $c = 0,01681$ Ом·с, $d = 80003,6$ Ом. Уравнение $f_2(p) = 0$ имеет три корня: $p_1 = -3,297 \cdot 10^8$ с⁻¹, $p_2 = -1,05 \cdot 10^7$ с⁻¹; $p_3 = -8,939 \cdot 10^6$ с⁻¹. Отметим, что численные значения R_K и C_K были выбраны из того соображения, что постоянная времени для корректирующей $R_K C_K$ -цепочки должна численно составлять порядка $T_k = R_K C_K = 100$ нс.

Используя выражение (8) и указанные значения корней характеристического уравнения $f_2(p) = 0$, найдем в последующем значения числителя и производной знаменателя для оригинала выходного напряжения $U_2(t)$:

$$f_1(0) = 3,6 \text{ Ом}; \quad (9)$$

$$f_2(0) = 80003,6 \text{ Ом}; \quad (10)$$

$$f_2(p_1) = -125,65 \text{ Ом}; \quad (11)$$

$$f_2'(p_1) = -8,726 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{с}; \quad (12)$$

$$f_1(p_2) = -0,516 \text{ Ом}; \quad (13)$$

$$f_2'(p_2) = 1,35 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{с}; \quad (14)$$

$$f_1(p_3) = 0,096 \text{ Ом}; \quad (15)$$

$$f_2'(p_3) = -1,159 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{с}. \quad (16)$$

Оригинал напряжения $U_2(t)$ на выходе делителя ОДН–1 определим исходя из выражений (8)–(16). В результате для $U_2(t)$ при $1(t) = 1$ В получаем:

$$U_2(t) = 1(t) [4,5 \cdot 10^{-5} + 1,44 \cdot 10^{-6} e^{-3,297 \cdot 10^8 t} - 3,822 \cdot 10^{-5} e^{-1,05 \cdot 10^7 t} - 8,283 \cdot 10^{-6} e^{-8,939 \cdot 10^6 t}]. \quad (17)$$

В выражении (17) имеем, что

$$\lim_{t \rightarrow 0} U_2(t) = 0 \quad \text{и} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} U_2(t) = 1(t)/k,$$

где k – коэффициент деления ОДН–1, равный $k = 22220$ [1,4]. На рис. 2 представлена НПХ для делителя ОДН–1 в виде

$$g(t) = U_2(t) \cdot k / U_1(t) = U_2(t) \cdot k / 1(t).$$

Приведенная на рис. 1 электрическая схема замещения делителя ОДН–1 и протекающие в ней процессы были смоделированы на компьютере с помощью программного продукта (комплекса) MICRO CAP 5.0 [8]. Результаты такого моделирования электромагнитных процессов в омическом делителе напряжения ОДН–1, при подаче на вход его электрической схемы замещения условно единичного напряжения, удовлетворяющего при $t \geq 0$ условно единичной функции Хевисайда $1(t) = 45$ мкВ, приведены на рис. 3. Данные рис. 3 демонстрируют нам переходную характеристику (ПХ) делителя ОДН–1.

Известно, что НПХ и ПХ рассматриваемого делителя отличаются только уровнем входного $U_1(t)$ и выходного $U_2(t)$ сигналов, а временная форма кривых выходного сигнала при этом будет одинакова для обоих случаев. Видно, что на рис. 2 и рис. 3 временная форма кривых выходных сигналов практически одинакова. Это свидетельствует о практической идентичности результатов для НПХ и ПХ применительно к делителю ОДН-1, полученных представленным выше аналитическим путем на основе интегрального преобразования Лапласа и путем численного расчета исследуемых процессов в схеме замещения делителя ОДН-1 на основе программного продукта (комплекса) MICRO CAP 5.0. Кривая рис. 2 позволяет определить собственное время нарастания НПХ для делителя ОДН-1. Данное время, в течение которого НПХ изменяется между уровнями 0,1–0,9 от своего максимального значения, составляет около 209 нс. Поэтому можно заключить, что примененная нами согласно рис. 1 в цепи НПД корректирующая $R_K C_K$ -цепочка не приводит к улучшению передаточных свойств омического делителя напряжения типа ОДН-1.



Рисунок 2 – Расчетная НПХ для делителя ОДН-1 при использовании в его НПД корректирующей $R_K C_K$ -цепочки (на основе метода Лапласа)

2. Расчет НПХ делителя ОДН-1 при использовании корректирующей индуктивности L_K . Рассмотрим второй способ возможного улучшения передаточных свойств исследуемого делителя напряжения типа ОДН-1, который заключается во включении в его НПД последовательно с резистором R_2 корректирующей индуктивности L_K . Электрическая схема замещения такого омического делителя напряжения преобразуется в виду, приведенному

на рис. 4. На рис. 4 приняты аналогичные рис. 1 обозначения за исключением величины L_K – корректирующей индуктивности. Для определения необходимой величины корректирующей индуктивности L_K в цепи НПД нами был использован программный продукт (комплекс) MICRO CAP 5.0 [8]. С помощью данной программы были смоделированы электромагнитные процессы в схеме, приведенной на рис. 4, с различными численными значениями используемой в НПД корректирующей индуктивности L_K : 1, 85 и 100 нГн.

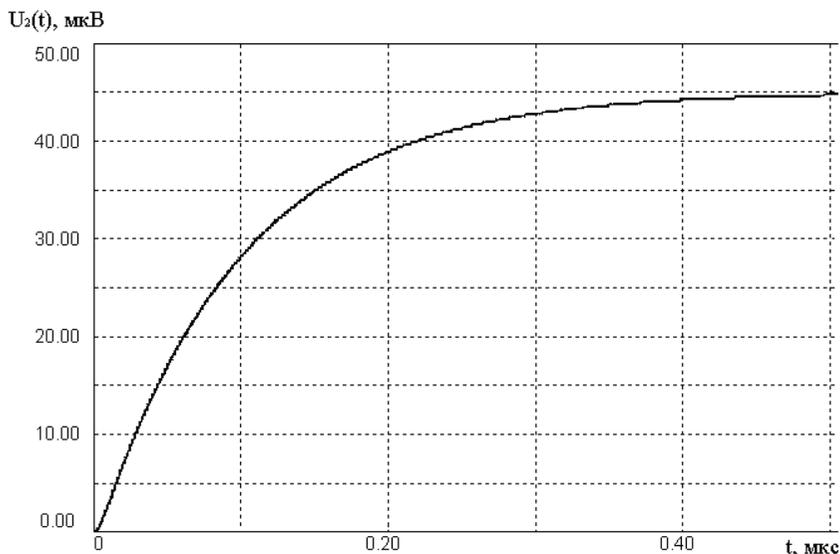


Рисунок 3 – Расчетная ПХ для делителя ОДН–1 при использовании в его НПД корректирующей $R_K C_K$ -цепочки (на основе численного моделирования)

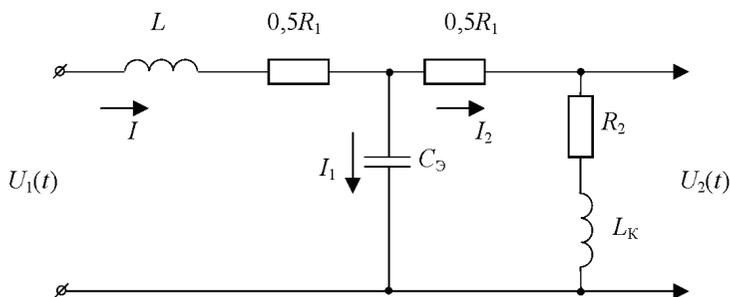


Рисунок 4 – Упрощенная схема замещения делителя ОДН–1 с использованием в его НПД корректирующей индуктивности L_K

На рис. 5–7 приведены результаты численного моделирования процессов, протекающих в схеме замещения делителя ОДН–1 согласно рис. 4.

$U_2(t)$, мкВ

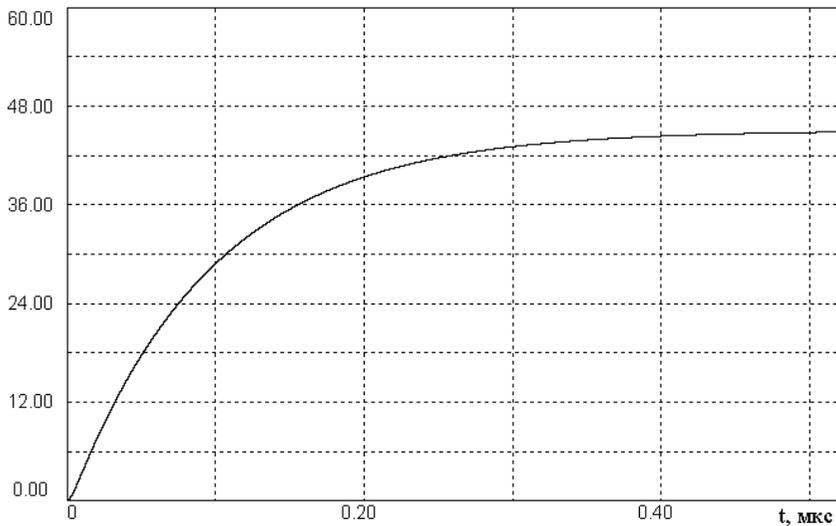


Рисунок 5 – Расчетная ПХ делителя ОДН–1 при использовании в его НПД корректирующей индуктивности $L_K = 1$ нГн (на основе численного моделирования)

$U_2(t)$, мкВ

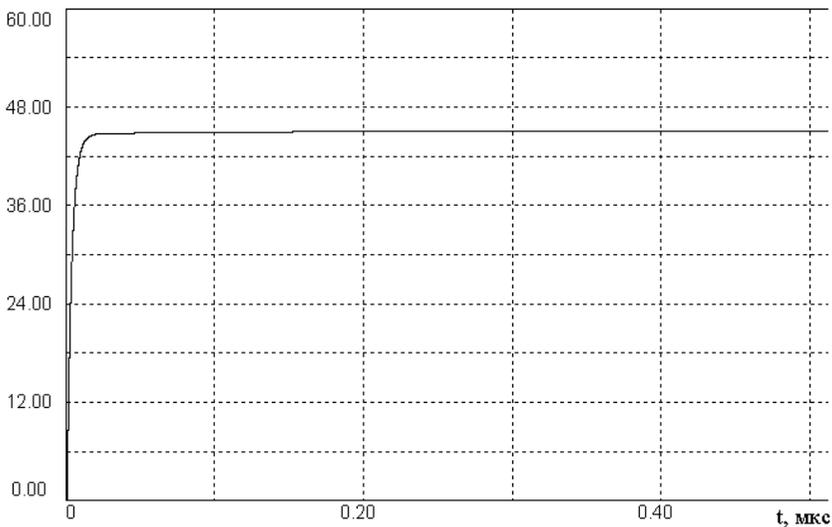


Рисунок 6 – Расчетная ПХ делителя ОДН–1 при использовании в его НПД корректирующей индуктивности $L_K = 85$ нГн (на основе численного моделирования)

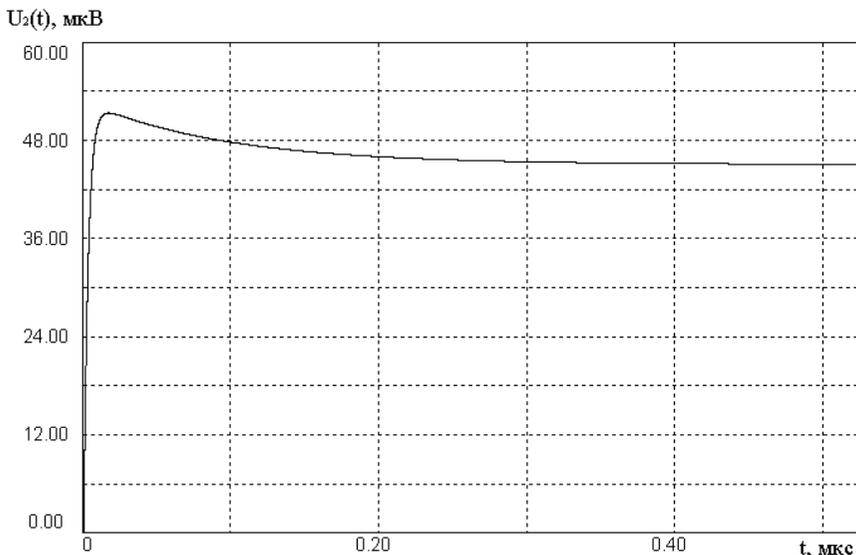


Рисунок 7 – Расчетная ПХ делителя ОДН–1 при использовании в его НПД корректирующей индуктивности $L_K = 100$ нГн (на основе численного моделирования)

Видно, что в случае применения корректирующей индуктивности величиной $L_K = 1$ нГн (см. рис. 5) она не оказывает существенного влияния на ПХ рассматриваемого делителя. При включении в НПД согласно рис. 4 корректирующей индуктивности $L_K = 85$ нГн (см. рис. 6) следует, что ПХ делителя ОДН–1 изменяется значительно круче по сравнению с ПХ, приведенной на рис. 5. В случае использования корректирующей индуктивности величиной $L_K = 100$ нГн (см. рис. 7) на кривой ПХ появляются значительные выбросы, которые не удовлетворяют требованиям ГОСТ 1516.2-97 [9]. При этом выброс выходного напряжения $U_2(t)$ в НПД делителя ОДН–1 может превышать пяти процентную норму от своего максимального значения.

Из данных рис. 5–7 следует, что рациональным вариантом для нас является случай, когда значение корректирующей индуктивности L_K в цепи НПД составляет около 85 нГн (см. рис. 6). Для подтверждения этого вывода проведем дополнительный анализ упрощенной схемы замещения, представленной на рис. 4. Для этого запишем в операторной форме по Лапласу систему уравнений, описывающих электромагнитные процессы в делителе ОДН–1:

$$\begin{cases} pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + \frac{1}{pC_3} I_1(p) = U_1(p); \\ pL \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I(p) + 0,5R_1 \cdot I_2(p) + I_2(p) \cdot (R_2 + pL_K) = U_1(p); \\ I(p) = I_1(p) + I_2(p). \end{cases} \quad (18)$$

Изображение тока $I_2(p)$ через НПД для ОДН–1 определим по формуле:

$$I_2(p) = I(p) \cdot \frac{(pC_3)^{-1}}{0,5R_1 + R_2 + pL_K + (pC_3)^{-1}}. \quad (19)$$

Далее изображение тока $I(p)$ определим из следующего выражения:

$$I(p) = \frac{U_1(p)}{pL + 0,5R_1 + \frac{(0,5R_1 + R_2 + pL_K) \cdot \frac{1}{pC_3}}{0,5R_1 + R_2 + pL_K + \frac{1}{pC_3}}}. \quad (20)$$

Следовательно, в итоге изображение тока $I_2(p)$ через НПД делителя ОДН–1 будет иметь следующий аналитический вид:

$$I_2(p) = \frac{U_1(p)}{pC_3 \cdot (pL + 0,5R_1) \cdot \left(0,5R_1 + R_2 + pL_K + \frac{1}{pC_3} \right) + 0,5R_1 + R_2 + pL_K}. \quad (21)$$

Тогда для изображения напряжения $U_2(p)$ на выходе ОДН–1 находим:

$$U_2(p) = \frac{4R_2 + 4L_K p}{p(ap^3 + bp^2 + cp + d)}, \quad (22)$$

где $U_1(p) = p^{-1}$ – изображение единичного скачка напряжения на входе омического делителя ОДН–1;

$$a = 4LC_3L_K; \quad b = 2C_3(LR_1 + 2LR_2 + R_1L_K); \\ c = 4(L + L_K) + C_3R_1(R_1 + 2R_2); \quad d = 4(R_1 + R_2).$$

Оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ аналогично (7) найдем при помощи теоремы разложения [6]. Для этого представим $U_2(p)$ по (22) в виде:

$$U_2(p) = \frac{f_1(p)}{p \cdot f_2(p)}, \quad (23)$$

где $f_1(p) = 4R_2 + 4pL_K$; $f_2(p) = ap^3 + bp^2 + cp + d$.

Так как один из корней знаменателя для $U_2(p)$ по (23) оказывается нулевым, то оригинал выходного напряжения $U_2(t)$ имеет следующий вид:

$$U_2(t) = \frac{f_1(0)}{f_2(0)} + \sum_{i=1}^3 \frac{f_1(p_i)}{p \cdot f_2'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (24)$$

где p_i – корни характеристического уравнения $f_2(p) = 0$.

Корни характеристического уравнения $f_2(p) = 0$ найдем с помощью программного пакета MathCad 14 [7]. Используем для этого прежние электрические параметры сосредоточенных элементов электрической схемы замещения делителя ОДН–1 согласно рис. 4. Можно показать, что в этом случае указанное уравнение имеет следующих три корня: $p_1 = -3,292 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$,

$p_2 = -1,05 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$; $p_3 = -1,187 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Используя (24) и указанные величины корней характеристического уравнения $f_2(p) = 0$, найдем численные значения числителя и производной знаменателя для оригинала выходного напряжения $U_2(t)$:

$$f_1(0) = 3,6 \text{ Ом}; \quad (25)$$

$$f_2(0) = 80003,6 \text{ Ом}; \quad (26)$$

$$f_1(p_1) = -108,33 \text{ Ом}; \quad (27)$$

$$f_2(p_1) = 2,42 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{с}; \quad (28)$$

$$f_1(p_2) = 0,03 \text{ Ом}; \quad (29)$$

$$f_2(p_2) = -7,742 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{с}; \quad (30)$$

$$f_1(p_3) = -4,012 \cdot 10^4 \text{ Ом}; \quad (31)$$

$$f_2(p_3) = -3,21 \cdot 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{с}. \quad (32)$$

Выражение для оригинала напряжения $U_2(t)$ на выходе делителя ОДН–1 определим из (24)–(32). В результате для $U_2(t)$ в его НПД получаем:

$$U_2(t) = 1(t) [4,5 \cdot 10^{-5} - 4,476 \cdot 10^{-5} e^{-3,292 \cdot 10^8 t} - 3,87 \cdot 10^{-7} e^{-1,05 \cdot 10^7 t} + 1,25 \cdot 10^{-7} e^{-1,18 \cdot 10^{11} t}]. \quad (33)$$

Из (33) следует, что $\lim_{t \rightarrow 0} U_2(t) = 0$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} U_2(t) = 1(t)/k$. На рис. 8 представлена НПХ для омического делителя ОДН–1 вида $g(t) = U_2(t) \cdot k / U_1(t)$ при $U_1(t) = 1(t)$ и корректирующей индуктивности, равной $L_K = 85 \text{ нГн}$.

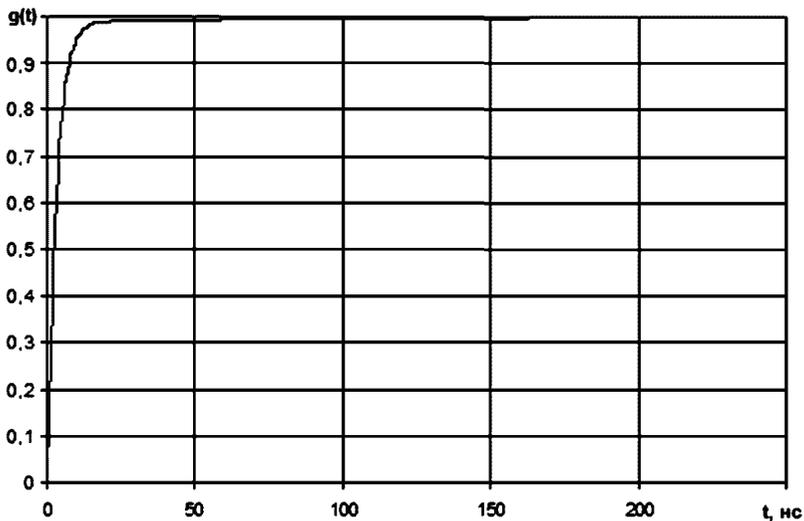


Рисунок 8– Расчетная НПХ для делителя ОДН–1 с использованием в его НПД корректирующей индуктивности L_K (на основе метода Лапласа)

Данные рис. 8 позволяют определить расчетное собственное время нарастания НПХ для анализируемого делителя ОДН–1 (время, в течение которого его НПХ изменяется между уровнями 0,1–0,9 от своего амплитудного значения), составляющее при этом около 7 нс. Видно, что использование корректирующей индуктивности $L_K = 85$ нГн в цепи НПД согласно рис. 4 существенно уменьшает (с 209 до 7 нс) собственное время нарастания НПХ делителя ОДН–1 без появления колебаний на ее кривой. Поэтому омический делитель напряжения ОДН–1 при использовании корректирующей индуктивности $L_K = 85$ нГн можно использовать как измерительное средство для регистрации быстроизменяющихся аperiodических и синусоидальных импульсов напряжения амплитудой до 1 МВ с длительностью их фронта около 70 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенный на основе аналитического расчета и численного моделирования приближенный анализ двух возможных методов улучшения переходной характеристики омического делителя напряжения типа ОДН–1 показал, что включение параллельно его НПД корректирующей $R_K C_K$ -цепочки ($R_K = 33$ Ом; $C_K = 3,3$ нФ) обеспечивает получение собственного времени нарастания НПХ делителя лишь до 209 нс и практически не улучшает передаточные свойства указанного делителя. Использование в электрической цепи НПД делителя ОДН–1 корректирующей индуктивности $L_K = 85$ нГн, включаемой последовательно с его активным сопротивлением $R_2 = 0,9$ Ом, обеспечивает существенное улучшение передаточных свойств делителя ОДН–1 с получением собственного времени нарастания его НПХ до 7 нс и позволяет использовать его как рабочее измерительное средство при измерении быстроизменяющихся во времени аperiodических и синусоидальных импульсов напряжения с длительностью их фронта около 70 нс и амплитудой 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 «ХПІ», – 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., Харків), ч. 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – С. 342. 3. Баранов М.И., Леденев В.В., Свічкарь О.С. Дослідження передатних властивостей омичного подільника напруги на 1 МВ // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (20-22 травня 2009р., Харків), ч. 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – С. 333. 4. Баранов М.И., Леденев В.В., Свічкарь А.С. Приближенный расчет переходной характеристики омического делителя напряжения на 1 МВ // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2009. – № 39. – С. 3–10. 5. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с. 6. Бессонов Л.А. Теоретические основы

электротехники: Электрические цепи. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с. 7. <http://www.ptc.com/products/mathcad/>. 8. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования MICRO CAP 5. – М.: СОЛОН, 1997. – 412 с. 9. *Межгосударственный ГОСТ 1516.2–97.* Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.

Поступила в редколлегию 25.03.2010