

# РОЗРАХУНОК КОАКСІАЛЬНИХ ШУНТІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГРОЗОВИХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ З АМПЛІТУДОЮ ДО 30 кА

Корнєв В.С., магістрант, Шостак В.О., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

**Вступ.** Сучасна практика і наукові дослідження у високовольтній техніці і фізиці плазми потребують вимірювань великих імпульсних струмів з тривалістю імпульсів від часток мікросекунд до декількох десятків і навіть сотень мілісекунд [1-4]. Наприклад, часто виникає необхідність реєструвати так звані грозові імпульси (ГІ) струму, зокрема, із формою 1.2/50, 4/10, 8/20, 30/60, 10/700, 10/350 мкс та ін. [4-7]. В даній роботі увага приділена розрахунку засобів для реєстрації грозових імпульсів струмів 8/20 та 10/350 мкс з амплітудами до 30 кА. Для реєстрації імпульсних струмів часто використовують вимірювальні шунти спеціального виконання з малою індуктивністю. При розробці та конструюванні вимірювальних шунтів вирішують проблеми, які пов'язані з точністю вимірювання (прояв скін-ефекту, індуктивності), з їх термічною та механічною стійкістю [1, 2, 8, 9]. Такі шунти застосовують як в лабораторних дослідженнях, в експлуатації і при реєстрації струмів реальних блискавок. В принципі, правильно сконструйовані сучасні вимірювальні шунти здатні багаторазово реєструвати аперіодичні імпульси струму 10/350 мкс короткотривалого удару штучної блискавки при амплітуді  $\pm 200$  кА та з інтегралом дії до  $13.5 \cdot 10^6$  Дж/Ом [4, 8, 9]. В деяких задачах, наприклад, для випробування розрядників та обмежувачів перенапруг певних типів, достатнім є використання струмів з амплітудою до 30 кА.

**Мета роботи:** проаналізувати і узагальнити різні методики розрахунку режимів та вибору конструкцій вимірювальних шунтів для реєстрації грозових імпульсів; для реєстрації струмів з амплітудою до 30 кА виконати розрахунки коаксіального циліндричного шунта (імпульс 8/20 мкс) та коаксіального дискового шунта (імпульси 8/20 та 10/350 мкс); перевірити можливість застосування окремих матеріалів для реалізації конструкцій шунтів і сформулювати відповідні рекомендації.

**Методика розрахунків коаксіальних шунтів.** Методики розрахунків шунтів аналізувалися і узагальнювалися на основі [1-4, 8, 9]. Характеристики електротехнічних матеріалів вибиралися згідно [10].

**Коаксіальний циліндричний шунт (КЦШ).** Розрахунок шунта проводився для наступних параметрів:

1. Вид імпульсу: амплітуда струму –  $I = 30$  кА, форма –  $T_1/T_2 = 8/20$  мкс.
2. Максимальна напруга шунта – 500 В.
3. Допустима кількість ударів на хвилину – 1 удар.
4. Активний опір – орієнтовно  $R = 0.015$  Ом (у випадку ніхрому).
5. Діаметр і довжина трубки шунта (рис.1) –  $d = 8$  мм,  $l = 322$  мм (як у існуючому прототипі, який планується модернізувати).
6. Товщина стінки трубки – орієнтовно  $\Delta = 1$  мм (для ніхрому).

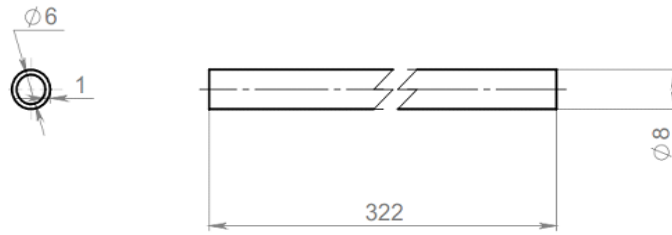


Рисунок 1 – Вимірювальний елемент коаксіального циліндричного шунта [11]

Найбільша допустима товщина стінки трубки шунта з урахуванням скін-ефекту:

$$\Delta = 0.3 \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу ( $1.149 \cdot 10^{-6}$  Ом·м для ніхром);  $\omega$  – кутова частота;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала.

Активний опір струму:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питомий опір,  $S = \pi r_{\text{зовнішнє}}^2 - \pi r_{\text{внутрішній}}^2$  – площа перерізу трубчатого провідника,  $l$  – довжина трубки. Товщина стінки – в межах  $\Delta$  за (1).

Напруга на виході шунта:

$$U = I \cdot R. \quad (3)$$

Температура нагрівання вимірювального елемента (ВЕ) за один імпульс:

$$\theta = \frac{R \cdot I^2 \cdot t}{S \cdot l \cdot \gamma \cdot c \cdot t'}, \quad (4)$$

де  $R$  – опір шунта,  $I$  – амплітуда струму,  $t$  – тривалість дії струму,  $c = 460$  Дж/(кг · град) – питома теплоємність (ніхром),  $\gamma$  – густина (ніхром –  $8400$  кг/м<sup>3</sup>).

Допустимий граничний струм, згідно розрахунку електродинамічних сил:

$$I_{\text{доп}} = 343 \sqrt{\frac{E}{1 - n^2} \cdot \frac{\Delta^3 (b + a)^2}{b^2 (b + 2a)}}, \quad (5)$$

де:  $b = 4$  мм – зовнішній радіус трубки шунта;  $a = 3$  мм – внутрішній радіус трубки шунта;  $E = 218 \cdot 10^9$  Па – модуль Юнга;  $n = 0.29$  – коефіцієнт Пуассона;  $\Delta \approx 1$  мм – товщина стінки шунта (параметри  $E$ ,  $n$  та  $\Delta$  наведено для ніхрому).

**Коаксіальний дисковий шунт (КДШ).** Для вимірювання великих струмів (масштабу 100 ... 200 кА) і з великими стрімкостями на фронті в роботах інших дослідників описано конструкції шунта з товщиною вимірювального диску  $\delta = 0,1$  мм, із зовнішнім діаметром  $D_1 = 80$  мм,  $D_2 = 40$  мм та активним опором вимірювального шунта  $R = 0.185$  мОм, рис. 2 [8]. В нашому випадку для діапазону вимірювання амплітуд струму від 0,1 до 30 кА, з урахуванням скін-ефекту, можна очікувати необхідні товщини тих же масштабів, але теплові і механічні дії слабші. Дисковий шунт розраховуємо для форми грозових імпульсів 8/20 та 10/350 мкс.

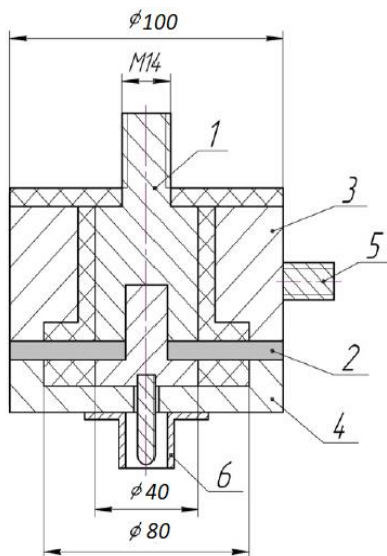


Рисунок 2 – Коаксіальний дисковий шунт [8]:

1 – вхідний електрод, 2 – резистивний елемент, 3 – головний вихідний електрод, 4 – вимірювальний вихідний електрод, 5 – приєднувальні елементи вихідного електроду, 6 – коаксіальний вихід.

Товщина стінки шунта з урахуванням скін-ефекту та напруга на виході розраховується за формулами (1) та (3) відповідно.

Активний опір струму для дискового шунта [8]

$$R = \rho \frac{(D_1 - D_2)}{\delta \pi (D_1 + D_2)}, \quad (6)$$

де  $D_1$  – зовнішній діаметр диску,  $D_2$  – внутрішній діаметр диску,  $\delta$  – товщина вимірювального диску,  $\rho$  - питомий опір.

Температура нагрівання ВЕ шунта:

$$\theta = \frac{J \cdot R}{m \cdot c}, \quad (7)$$

де  $m$  – маса шунта,  $J$  – інтеграл дії,  $c$  – питома теплоємність.

Інтеграл дії:

$$J = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad . \quad (8)$$

**Результати розрахунків.** Для коаксіального циліндричного шунта результати розрахунків представлено в табл. 1, а для коаксіального дискового шунта – в табл. 2 та 3. Результати розрахунків максимальної допустимої товщини стінки/пластини вимірювального елемента шунта з урахуванням скін-ефекту для різних форм імпульсів (з часом фронту 1.2, 4, 8, 10, 30 мкс) узагальнено на рис. 3 і вони стосуються обох типів шунтів.

Таблиця 1 – Результати розрахунків коаксіального циліндричного шунта для імпульсу 30 кА, 8/20 мкс

| Матеріал         | $\Delta$ , мм | $R$ , Ом              | $U$ , В | $\theta$ , град | $I_{\text{доп}}$ , А |
|------------------|---------------|-----------------------|---------|-----------------|----------------------|
| Ніхром           | 0,915         | 0.017                 | 504.719 | 2.572           | $9.261 \cdot 10^6$   |
| Мідь М2          | 0,114         | $2.606 \cdot 10^{-4}$ | 7.819   | 0.040           | $7.325 \cdot 10^6$   |
| Алюміній АД31    | 0,158         | $5.037 \cdot 10^{-4}$ | 15.111  | 0.076           | $5.378 \cdot 10^6$   |
| Латунь Л80       | 0,616         | $8.785 \cdot 10^{-3}$ | 263.561 | 1.332           | $7.869 \cdot 10^6$   |
| Сталь 112Х18Н10Т | 0,723         | 0.011                 | 318.469 | 1.591           | $5.34 \cdot 10^6$    |

Таблиця 2 – Результати розрахунків коаксіального дискового шунта для імпульсу 30 кА, 8/20 мкс

| Матеріал         | $\Delta$ , мм | $R$ , Ом              | $U$ , В | $\theta$ , град       |
|------------------|---------------|-----------------------|---------|-----------------------|
| Ніхром           | 0.915         | $1.332 \cdot 10^{-4}$ | 3.995   | $3.306 \cdot 10^{-3}$ |
| Мідь М2          | 0.114         | $1.657 \cdot 10^{-5}$ | 0.497   | 0.027                 |
| Алюміній АД31    | 0.158         | $2.304 \cdot 10^{-5}$ | 0.691   | 0.016                 |
| Латунь Л80       | 0.616         | $9.622 \cdot 10^{-5}$ | 2.887   | 0.151                 |
| Сталь 112Х18Н10Т | 0.723         | $1.058 \cdot 10^{-4}$ | 3.173   | 0.171                 |

З табл. 1 видно, що для реалізації циліндричного шунта при формі імпульсу 8/20 мкс найбільш прийнятними є сталь 112Х18Н10Т, латунь Л80 та ніхром. Інші матеріали вимагають занадто тонких стінок трубки, які важко реалізувати. При цьому напруга на виході шунта становить 264...505 В, а нагрівання його вимірювального елемента за один імпульс – 1.3...2.6 градусів.

Таблиця 3 – Результати розрахунків коаксіального дискового шунта для імпульсу 30 кА, 10/350 мкс

| Матеріал         | $\Delta$ , мм | $R$ , Ом              | $U$ , В | $\theta$ , град       |
|------------------|---------------|-----------------------|---------|-----------------------|
| Ніхром           | 1.024         | $1.191 \cdot 10^{-4}$ | 3.572   | $2.956 \cdot 10^{-3}$ |
| Мідь М2          | 0.127         | $1.482 \cdot 10^{-5}$ | 0.445   | 0.024                 |
| Алюміній АД31    | 0.177         | $2.061 \cdot 10^{-5}$ | 0.680   | 0.014                 |
| Латунь Л80       | 0.739         | $8.606 \cdot 10^{-5}$ | 2.582   | 0.135                 |
| Сталь 112Х18Н10Т | 0.813         | $9.461 \cdot 10^{-5}$ | 2.838   | 1.204                 |

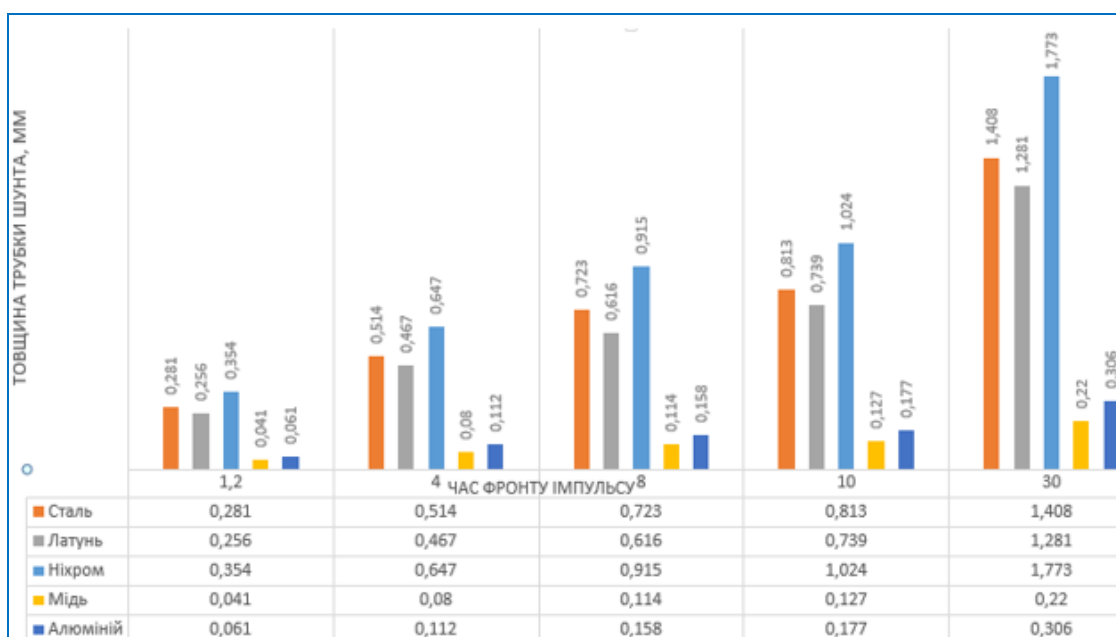


Рисунок 3 – Максимально допустимі за урахування скін-ефекту товщини стінки трубки КЦШ чи товщини пластини КДШ в залежності від тривалості фронту імпульсу (1.2, 4, 8, 10, 30 мкс) та матеріалу (сталь, латунь, ніхром, мідь, алюміній)

Вимірювальні елементи дискової конструкції шунта можна легко реалізувати з будь-якого з розглянутих матеріалів. Для відносно невеликої амплітуди струму у 30 кА можна очікувати відсутність проблем з тепловою та механічною стійкістю конструкції.

З порівняння результатів розрахунків для циліндричного та дискового шунтів можна відзначити, що, для амплітуди струму у 30 кА і форми імпульсу 8/20 мкс, напруга на виході у КДШ з вимірювальним елементом з ніхрому становить 4 В, а у КЦШ – 505 В, тобто у 126 разів менша. Це свідчить про те, що для такого дискового шунта немає потреби застосовувати подільник напруг для приєднання типового USB-осцилографа, на відміну від випадку з коаксіальним циліндричним шунтом.

Теплові режими для прийнятої розрахункової частоти подачі імпульсів (не більше одного розряду на хвилину) є прийнятними – нагрівання в межах одиниць та часток градусів. Додатковим аргументом є те, що нагрівання оцінювалося лише для вимірювального елемента, а не масивної конструкції шунта в цілому. Для більшої точності вимірювань і відсутності перегрівання шунта можна рекомендувати зменшення частоти приблизно в 5 разів.

**Висновок.** Проаналізовано і узагальнено існуючі методики розрахунку КЦШ та КДШ, які враховують амплітуду і форму імпульсів струму, частоту їх надходження, матеріал ВЕ шунта, скін-ефект, теплові та механічні режими. Виконані розрахунки таких шунтів з ВЕ із різних матеріалів для реєстрації ГІ струмів до 30 кА (8/20 та 10/350 мкс) показують, що для вибраних конструкцій теплові і механічні впливи є незначними. Для ВЕ КЦШ краще вибрати ніхром чи нержавіючу сталь чи латунь, для КДШ – будь-які з розглянутих матеріалів. Для імпульсу 8/20 мкс напруга на виході КДШ (4 В – ніхром, 3.17 В – сталь 12Х18Н10Т) значно менша (у 126 та 100 разів, відповідно), ніж для КЦШ. Отже, вимірювання сигналу з дискового шунта можна здійснювати безпосередньо за допомогою типового USB-осцилографа, в той час як у випадку циліндричного шунта потрібно застосовувати подільник напруг. Узагальнені методики, складені програми і результати розрахунків параметрів шунтів можуть бути використані для подальшого їх конструювання.

#### Перелік посилань

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении, М.: Энергоатомиздат, 1983. – 149-163 с.
2. Болотин І. Б., Эйдель Л. З. Измерения в переходных режимах короткого замыкания Л.: Энергия, 1981. – с. 12-33.
3. Авруцкий В.А., Кужекин И.П., Чернов Е.Н. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента, М.: МЭИ, 1983. – с.208-212.
4. Баранов М.І, Кязев В.В., Рудаков С.В.. Расчетная и опытная оценка результатов электродинамического воздействия нормированого по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали // Електротехніка і електромеханіка, №1, 2017. – 31-35 с.
5. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектроних средств. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
6. ДСТУ 3681-98. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань (ГОСТ 30585-98).
7. ДСТУ EN/IEC 62305. Lightning Protection.
8. Днищенко В.Н., Еремеев В.О., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г. Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007, № 20. – 75-79 с.
9. Бедерева Е.В. Совершенствование динамических характеристик коаксиальных шунтов переменного тока. Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, Томск, 2014. – с.12-35.
10. Характеристики електротехнічних матеріалів (в розділі “Физические свойства”): [http://www.zaogross.ru/soprotivlenie\\_nihroma.html#33](http://www.zaogross.ru/soprotivlenie_nihroma.html#33).
11. Корнев В. С. Шунты для реєстрації струмів блискавки. Дипл. роб., бакалавр, 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». – Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 71 с.