

## МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ

**Козлов О.Ю., магістрант, Шостак В.О., к.т.н., доц.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг*

**Вступ.** Важливим питанням розробки і експлуатації високовольтних випробувальних установок є застосування моделювання режимів їх роботи. Зокрема, це стосується і генераторів грозових імпульсних напруг. Зазвичай такі генератори розраховували аналітично за спрощеними моделями, але і при цьому йдеться про досить громіздкі схеми з багатьма активними та реактивними елементами. Наявність сучасних схемотехнічних програм надає зручну можливість більш детально і точніше виконувати відповідні розрахунки та аналіз. У цьому випадку можна також враховувати різні додаткові фактори (паразитні ємності та індуктивності високовольтної конструкції, опір каналу розряду та ін.). Зокрема, у звичайних розрахунках генераторів імпульсних напруг (ГІН) часто не враховують часові характеристики спрацювання розрядників, ємності об'єкту випробувань, затримку розряду основного проміжку, параметри каналу розряду та ін. [1-3]. Тому доцільно напрацювати методику моделювання зазначених установок в стандартних схемотехнічних програмних середовищах, зокрема з врахуванням особливостей розвитку розряду в іскровому проміжку.

**Мета роботи:** Моделювання генератора імпульсних напруг (ГІН) з використанням схемотехнічного програмного забезпечення та застосуванням критерію Кінда для моделі іскрового розрядного проміжку.

**Матеріали і результати досліджень.** Для моделювання ГІН вибрано програмний комплекс Micro-Cap 11 Evaluation, оскільки він дозволяє відносно просто та з достатньою точністю відтворити процеси, які відбуваються в його розрядному колі. Складено відповідну схему заміщення ГІН-500 (рис.1), яка відповідає схемі Маргера і в яку включено паразитні ємності між найбільш габаритними частинами установки та землею [1, 4]. На рис. 1. опори R1...R6 моделюють зарядні резистори схеми ГІН-500, тоді як опори R10-12, R14 задають фронт імпульсу, а R7-R9 та R13 відповідають за розряд основних конденсаторів (C1-C4), формуючи спад імпульсу. Ключі SW1-SW4 спрацьовують із затримкою, моделюючи розрядні проміжки ГІН і враховуючи час, потрібний на пробій кожного з розрядників. Елемент L2 представляє індуктивність шини, яка з'єднує генератор та розрядний проміжок. Елементи R15, L1, C5 та SW7 моделюють розрядний іскровий проміжок, утворюючи свій коливальний контур. Для обмеження струмів у схемі зарядки конденсаторів використовується резистор R17, а встановлення вимикача SW6 дозволяє відділити зарядну частину схеми від генератора під час розряду. Резистор R16 відображає опір для обмеження струму, який виникає в основному контурі при розряді конденсаторів. Конденсатори C6-C13 моделюють вплив ємностей, які утворюються між фланцями конденсаторів та землею.

Для розрахунку цих ємностей прийнято наближення, що з'єднувальні елементи та фланці конденсаторів являють собою горизонтальний циліндр з

діаметром  $a=0.15$  м та довжиною  $l=1$  м. Відстань до землі для кожної сходинки ГІН відрізняється, тому розрахунок паразитних ємностей для кожної сходинки проведено з відповідною відстанню  $d$  за наступною формулою, згідно [4], наприклад, для  $C_6$  та  $C_9$ :

$$C_6 = C_9 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{d}{a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1}\right)} = 3.399 \cdot 10^{-11} \text{ Ф},$$

де для першого ступеня відстань до землі  $d=0.4$  м, а для наступних –  $d=0.8$ ,  $1.2$  та  $1.6$  м; усереднений діаметр конденсаторів та фланців –  $a=0.15$  м.

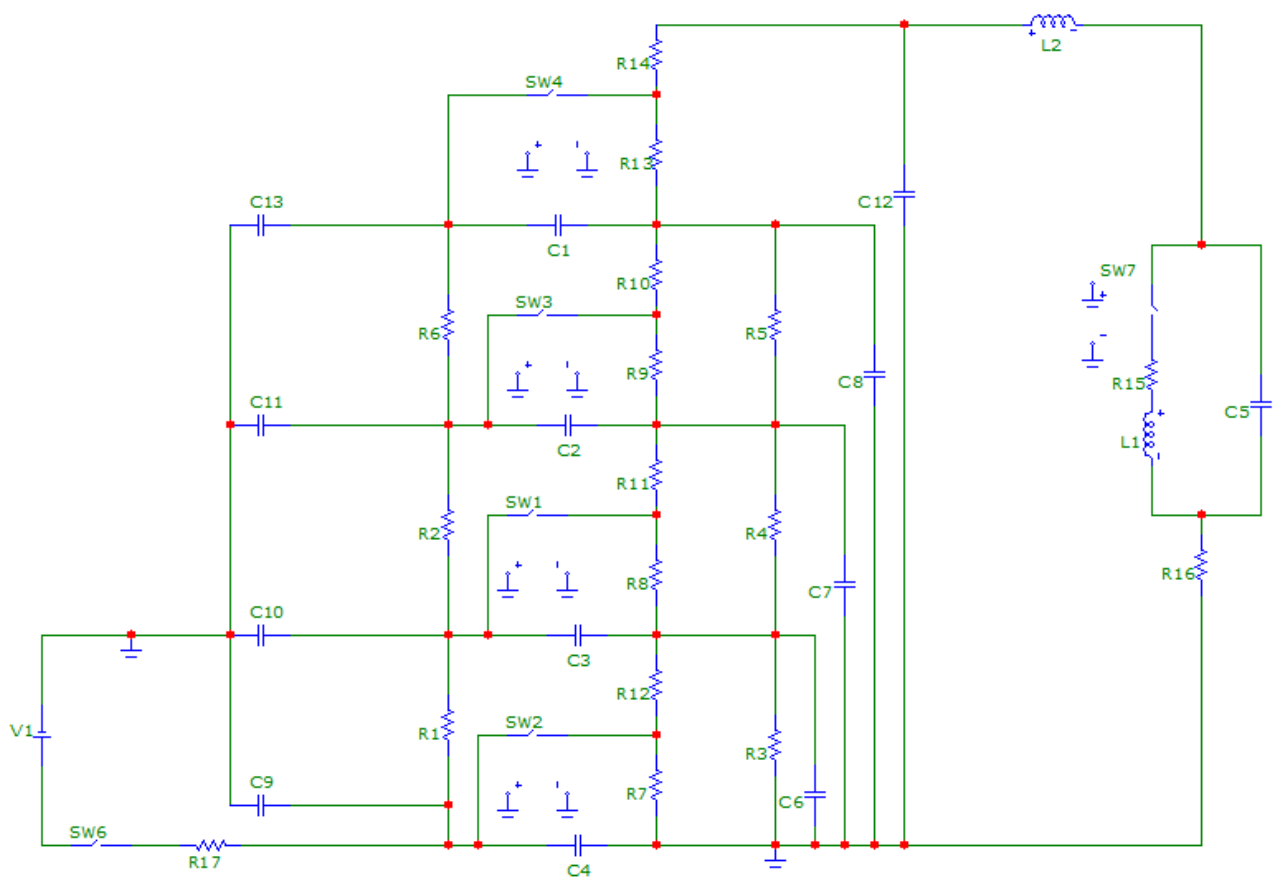


Рисунок 1 – Схема змодельованого ГІН

Ємність розрядного проміжку стрижень-площина оцінено за формулою [4]:

$$C_5 = 4\pi\epsilon\epsilon_r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh\left(\ln(D + \sqrt{D^2 - 1})\right)}{\sinh\left(n \ln(D + \sqrt{D^2 - 1})\right)},$$

де  $r_e = 0.005$  м – еквівалентний радіус стрижня;  $f = 0.3$  м - довжина розрядного проміжку,  $D = \frac{f}{r} = 60$ ;  $n = 130$  (хоча, звичайно, для оціночних розрахунків можна брати суттєво менше значення).

Індуктивність підвідних шин та розрядного каналу розраховано за формулою [5]:

$$L = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{2b}{r} \right) - 0.75 \right),$$

де  $b = 1.45$  м – довжина шин,  $r = 0.0015$  м – їх еквівалентний радіус. Тоді відповідно індуктивність шин становить  $L2 = 1.628 \cdot 10^{-6}$  Гн, а індуктивність каналу з довжиною  $b = 0.3$  м та радіусом  $r = 0.001$  м –  $L1 = 3.804 \cdot 10^{-7}$  Гн.

Активний опір дротяного резистора на вертикальній опорі столу, який застосовують для обмеження амплітуди розрядного струму, за результатами обміру, становить  $R16 = 1685$  Ом. Вимірювання індуктивності цього опору свідчить про мале її значення, яким можна нехтувати.

Значення деяких інших ємностей та опорів резисторів взято з маркування частин ГІН і його документації. Для спрощення моделювання, трансформатор та схему випрямляча Латура замінено джерелом постійного струму з напругою 43 кВ, ключем SW6 та обмежуючим зарядний струм опором R17 (див. рис. 1).

Результати розрахунків та номінали елементів схеми наведено в табл. 1 та 2.

Таблиця 1 – Параметри еквівалентної схеми ГІН (розрахункові)

C5, пФ	C6, C9, пФ	C7, C10, пФ	C8, C11, пФ	C12, C13, пФ	R15, Ом	L1, мкГн	L2, мкГн
0.556	33.9	23.59	20.09	18.19	15	0.38	1.628

Таблиця 2 – Параметри еквівалентної схеми ГІН (згідно документації)

C1-C4, мкФ	R1-R6, кОм	R7-R9, R13, Ом	R10-R12, R14, Ом	R16, Ом	V1, кВ
0.14	18	555	46	1685	43

Ємностями, які утворюються в проміжках шина-шина та шина-земля, можна знехтувати, оскільки при наявних значних відстанях вони досить малі і не призводять до помітної зміни параметрів хвилі напруги на виході схеми.

Одним із завдань в процесі моделювання ГІН є імітація роботи розрядників. Вона вирішена за допомогою використання вимикачів, які

спрацьовують послідовно з певною затримкою, імітуючи час, потрібний для розвитку розряду в розряднику кожної сходинки ГІН. А для моделювання розряду в основному проміжку стрижень-площина (з міжелектродною ємністю C5) використано вимикач SW7, який спрацьовує з певною затримкою після всіх ступеневих розрядників і вмикає паралельно до C5 індуктивно-резистивне навантаження, пов'язане з активним опором каналу та його індуктивністю, що відповідає досить значній довжині каналу розряду [6]. На прикладі основного проміжку нижче буде пояснено як оцінювався час розряду в ньому із застосуванням критерію Кінда.

Результати аналізу режиму перехідних процесів та залежності струму в індуктивності L2 і напруги розрядного проміжку (на конденсаторі C5) наведено на рис. 2, 3 та 4.

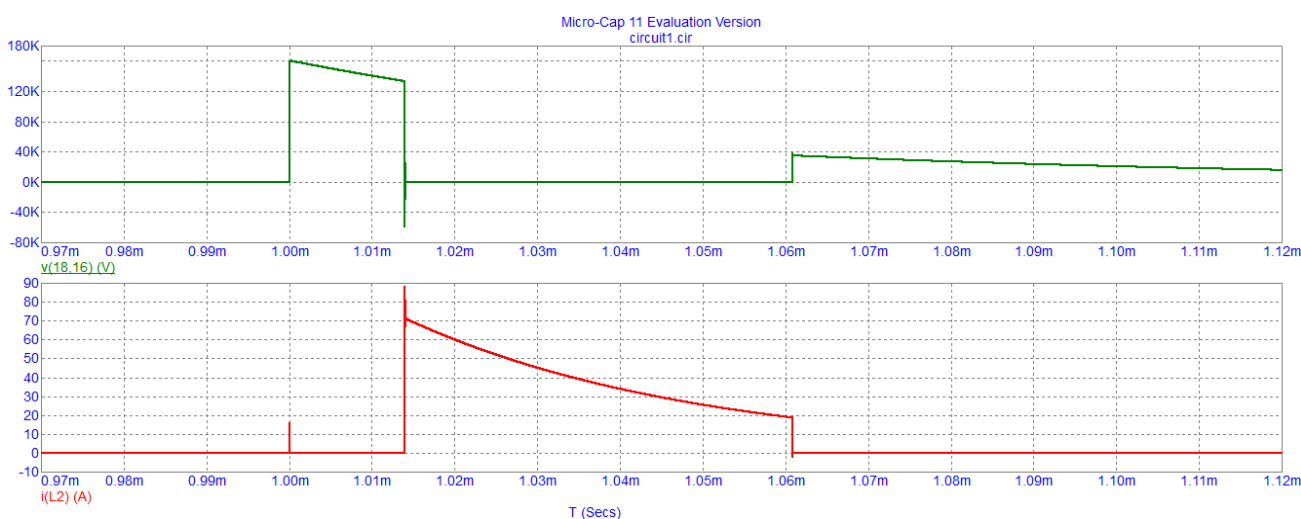


Рисунок 2 – Залежності струму в L2 та напруги на розрядному проміжку (C5) від часу

Момент пробую розрядного проміжку для даної схеми було оцінено і введено наступним чином. Спочатку визначено апроксимацію імпульсу напруги на холостому ході (до пробую основного проміжку):

$$U(t) = 159 \cdot 10^3 \cdot 1.003 \cdot \left( e^{-(3.043 \cdot 10^4)t} - e^{-(9.2 \cdot 10^7)t} \right).$$

Далі за критерієм Кінда визначено момент пробую. Для цього розраховано площу  $A$  під графіком  $U(t)$  до рівня пробивної постійної напруги та прирівняно її до площі визначеної за критерієм Кінда [2]. Для розрядного проміжку стрижень-площина при позитивній полярності стрижня значення відносної площі становить  $650 \frac{\text{кВ} \cdot \text{мкс}}{\text{м}}$  (табл. 7.46 у [2]), що у свою чергу для проміжку довжиною 30 см відповідає величині  $A = 0,195 \text{ В} \cdot \text{с}$ .

Напруга пробою такого ж проміжку (30 см) на постійній напрузі становить близько  $U = 133 \text{ кВ}$  [3, 7].

Для визначення згаданої площі  $A$  під кривою  $U(t)$ , справедливе таке рівняння:

$$\int_{t_1}^{t_2} |u(t) - U| dt = A ,$$

де час  $t_1$  відповідає моменту досягнення напругою в імпульсі величини  $U$ , а  $t_2$  – момент пробою розрядного проміжку за іскровим механізмом. Звідси для даного імпульсу знаходимо  $t_2 = 13.79 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ .

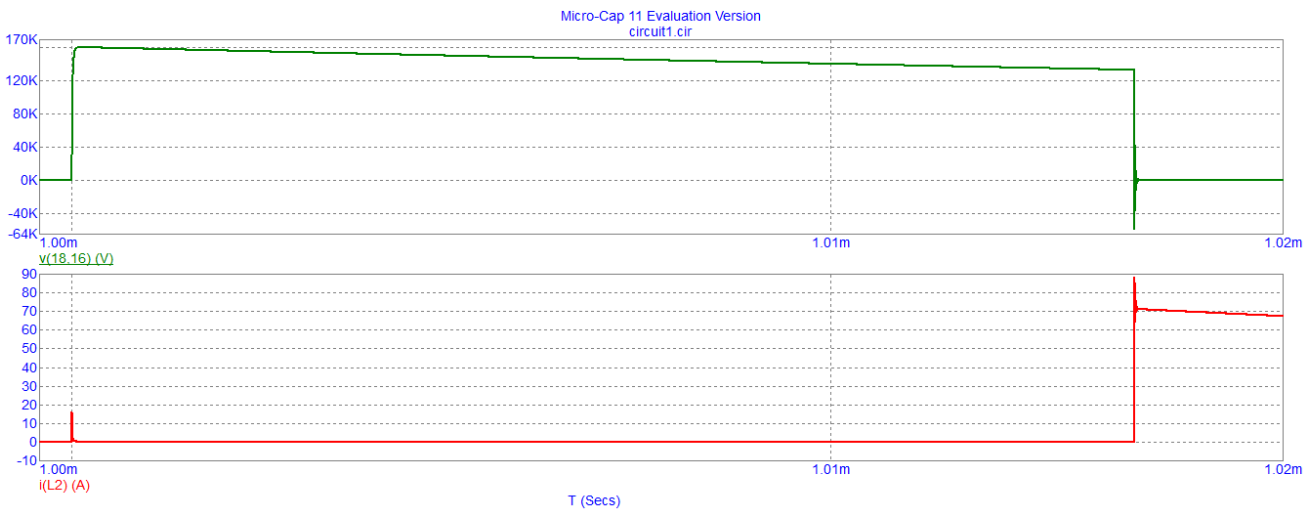


Рисунок 3 – Деталі осцилограм поблизу моменту виникнення пробою в головному проміжку (159 кВ та 71 А)

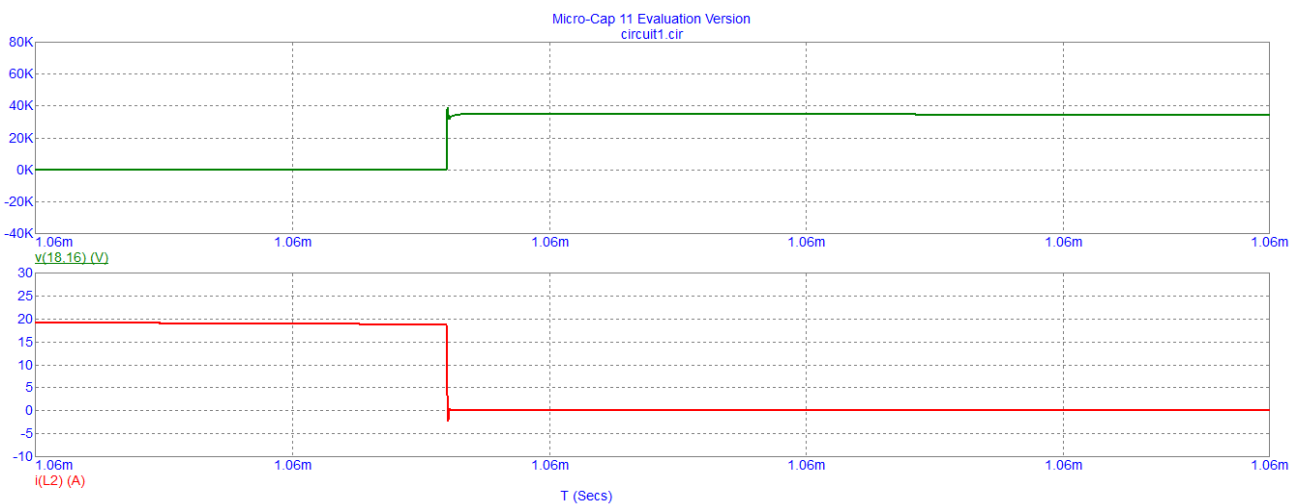


Рисунок 4 – Зміна напруги та струму в головному розрядному проміжку при згасанні розряду

Момент згасання іскри можна оцінити за критерієм зниження напруги імпульсу на джерелі приблизно до 10% від максимального значення [5]. (В дослідах з реєстрацією оптичного сигналу з каналу цей рівень складає десь при 20...30 % [6]). Це відображується на осцилограмах  $U(t)$  та  $I(t)$  відповідно різким підвищенням напруги та швидким повним зникненням струму десь через 47 мкс після пробою, рис. 4.

**Висновок.** Моделювання генератора імпульсних напруг за допомогою схемотехнічного програмного забезпечення дозволяє оцінити форму напруги при виборі параметрів генератора для отримання грозового імпульсу та визначити параметри струмів, які протікають в розрядних колах.

Застосування критерію Кінда для іскрового проміжку дає можливість оцінити час пробою головного проміжку і відтворити його в еквівалентній схемі відповідною затримкою вмикання каналу розряду (представленого активним опором та індуктивністю) на проміжок, електроди якого представлено міжелектродною ємністю.

Отримані таким чином результати аналізу дають більш детальну картину режимів розряду ГН з урахуванням додаткових параметрів установки (паразитних ємностей, індуктивностей, затримки спрацювання розрядників) та головного розрядного проміжку.

#### Перелік посилань

1. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Високовольтні випробувальні установки» для підготовки спеціалістів та магістрів за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». Денна форма навчання / Уклад. В.І. Хомінч.– К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2015.– 67 с.
2. Бейер М., Бёк В., Мёллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
3. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений/ Учебное пособие. - Киев: Изд-во Киевского университета, 1967. – 444 с.
4. Коржиманов А. Электрическая ёмкость [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая\\_ёмкость](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая_ёмкость).
5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Козлов О. Ю. «Датчики системы мониторингу блискавок» / Дипломна робота на здобуття ступеня бакалавра з напрямку підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». - НТУУ, Київ, 2016. – 83 с.
7. Искровой разряд в воздухе / Базелян Э.М., Ражанський И.М. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. – 165 с.