

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАРЯДУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

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

КПІ імені Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Використання імпульсних генераторів високої струму та напруги у різноманітних задачах вимагає точного контролю параметрів на їх виході [1-5]. Застосування для цього сучасних високоточних вимірювальних пристроїв струму та високої напруги потребує значних фінансових вкладень. Використання інтегрального методу визначення заряду [1] дозволяє відносно просто калібрувати такі засоби як котушки Роговського та малоіндуктивні шунти [3, 4] при реєстрації струмів, як коливального, так і аперіодичного характеру. Ці засоби мають певні обмеження. В даній роботі представлено результати оцінки точності вимірювань при застосуванні згаданого методу до окремих таких засобів, що використовуються в лабораторному стенді з імпульсними струмами масштабу ~30 кА із коливальною формою ~4/10 мкс.

Мета роботи: 1) Провести оцінку вимірювання амплітуд імпульсних струмів із застосуванням інтегрального методу визначення заряду та порівняти ці результати із такими, які отримано з використанням розрахованих коефіцієнтів чутливості при реєстрації струму за допомогою шунта (Ш). 2) Сформулювати рекомендації, щодо використання даного методу для вимірювання струму за допомогою котушки Роговського (КР) та Ш. 3) Розробити програму для обробки даних за інтегральним методом.

Матеріали і результати досліджень. Для оцінки амплітуд імпульсних струмів за інтегральним методом визначення заряду було проведено досліди з генератором імпульсних струмів (ГІС). Зарядна напруга генератора в кожному досліді вимірювалася за допомогою електростатичного кіловольметра С196 та становила приблизно 10 кВ [1].

Реєстрація струму проводилась за допомогою котушки Роговського та малоіндуктивного шунта опір якого становить близько $R_{ш} = 1.85$ мОм. Сигнал з шунта та котушки Роговського реєструвався за допомогою USB осцилографу Oscill [6]. Для обробки даних розроблено спеціальну програму.

Методика застосування інтегрального методу полягає в наступному:

1. Спочатку потрібно провести графічне інтегрування в часі отриманої осцилограми струму $i(t)$. Результатом такого інтегрування буде крива зміни у часі заряду, який протікає через шини генератора імпульсних струмів, рис.1 [1, 6].

2. Інтеграл $\int idt = Q$ може бути визначений через відомі величини ємності C та напруги U заряду конденсаторної батареї ГІС $Q = CU$. Це дозволяє проградувати вісь ординат графіка для кривої заряду у відносних одиницях і знайти відповідний масштаб у кулонах. У процесі графічного інтегрування по осі ординат відкладаються чисельні значення $\int idt$ виражені у «точках», отриманих у

файлі при реєстрації осцилографом. Моменту t_m (перший максимум струму) відповідає виражена в кулонах ордината q , яка дорівнює $\int_0^{t_m} i dt$ – площі криволінійного трикутника OAB на рис. 1.

3. Для визначення I_m в амперах на графіку струму будують прямокутник з висотою I_m , рівновеликий за площею інтегралу $\int_0^{t_m} i dt$, і визначають час t (для даних графіків – в секундах). Тоді шукане значення амплітуди імпульсу струму знаходять з виразу: $I_m = \frac{q}{t}$.

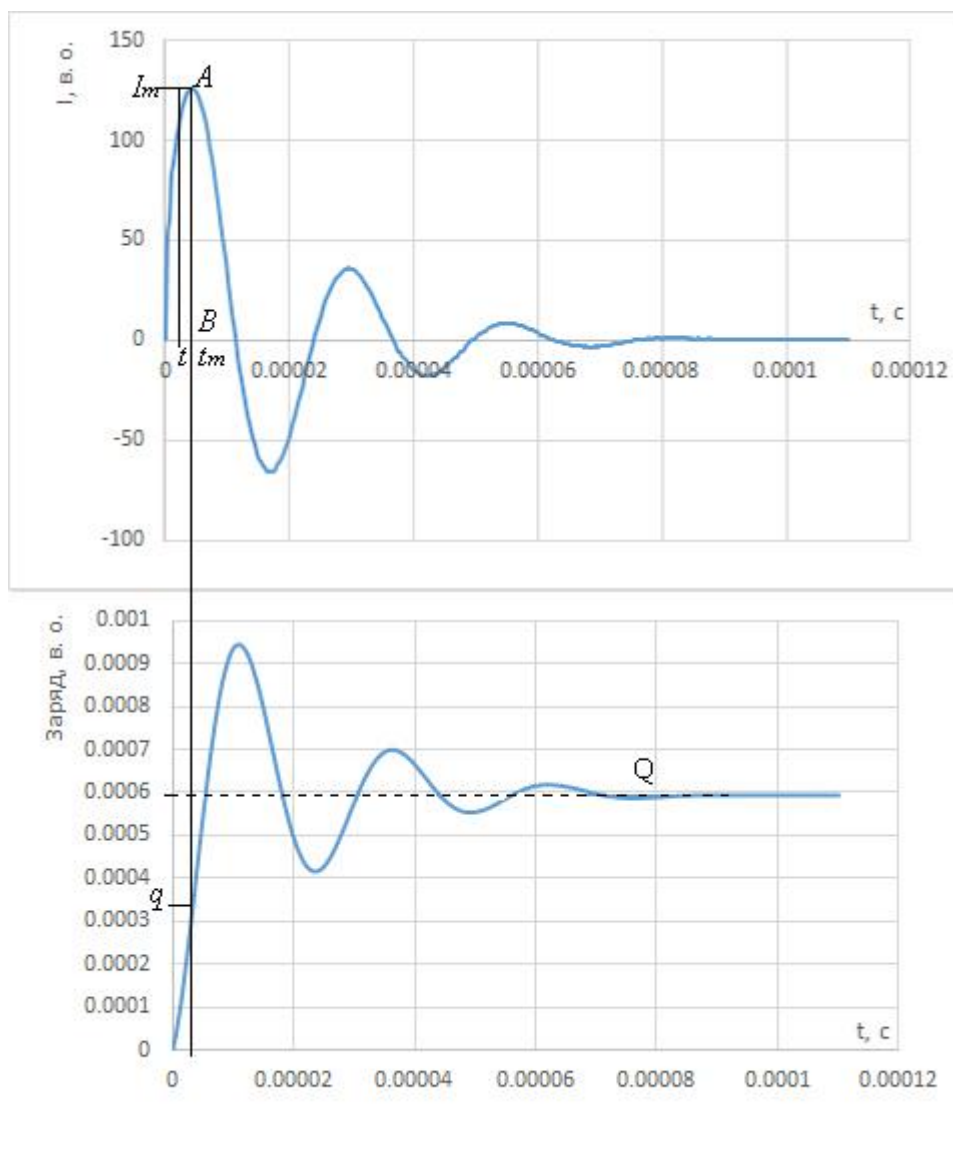


Рисунок 1 – Графічне інтегрування струму імпульсного розряду за методом [1]

Приклад експериментальних осцилограм, отриманих в ході досліджень за допомогою котушки Роговського, показано на рис. 2. З рис. 2 видно, що наявність впливу ймовірно електростатичного поля на КР значно знижує «хвіст» графіку

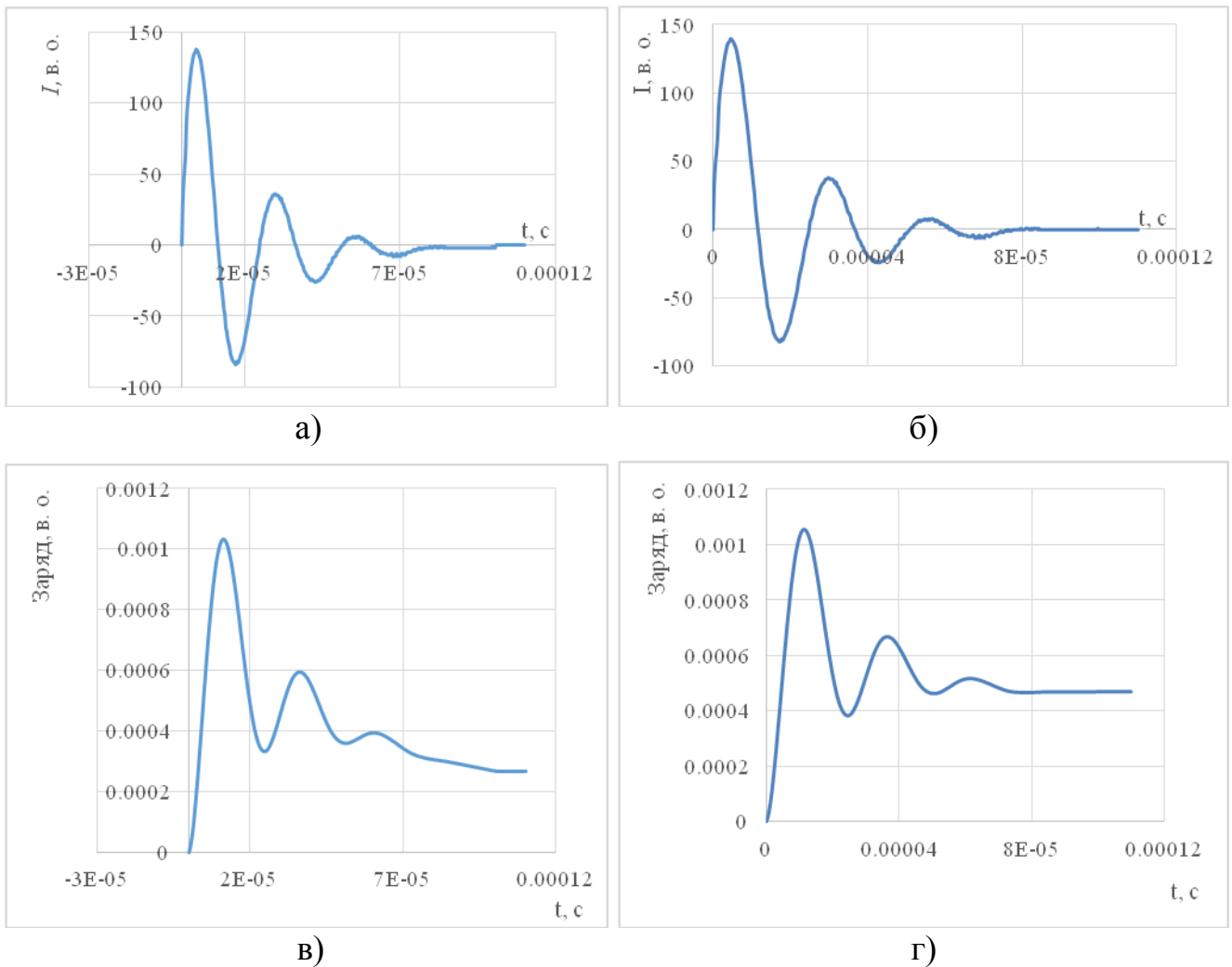


Рисунок 2 – Зареєстровані за допомогою КР струми та їх інтеграли без компенсації електростатичного впливу (а та в) та з його компенсацією (б та г)

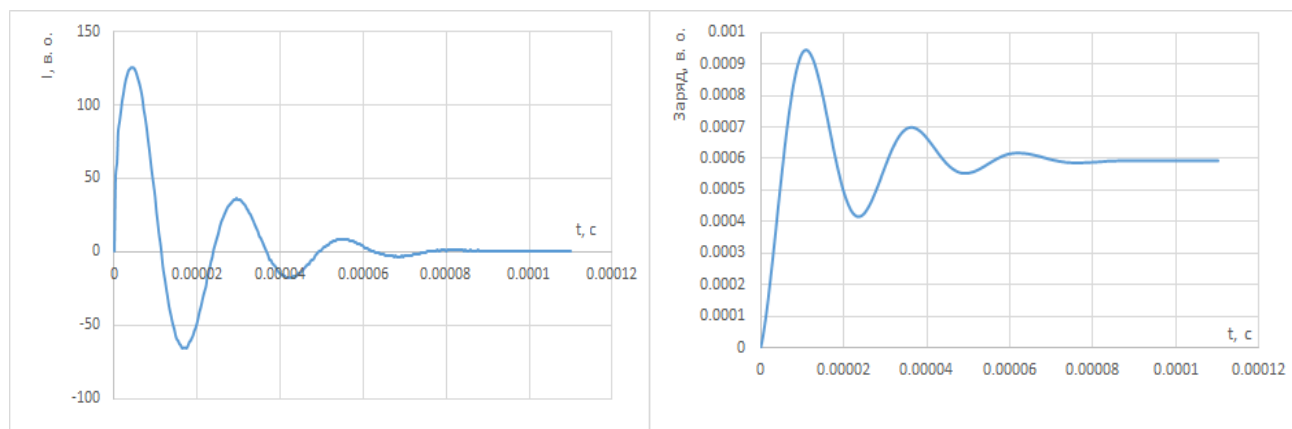
зміни в часі заряду, що призводить до суттєвих похибок при визначенні струму, як видно з табл. 1. Як перше наближення, чисельна компенсація впливу проводилась методом віднімання значення «хвостової» постійної складової графіку (між 85 та 100 мкс) від реєстрованих значень для всієї кривої струму [7].

На рис. 3 представлено осцилограму струму з шунта. Сторонні впливи не проявляються, тому в цьому випадку компенсацію виконувати непотрібно.

Результати обробки отриманих осцилограм за методом інтегрування наведено в табл. 1. Базою для порівняння в даних дослідженнях будемо вважати розрахунок струму за допомогою відомого помірного опору шунта та амплітуди записаного сигналу напруги на ньому. Цей струм становить 21.12 кА. Використання методу інтегрування для осцилограми, отриманої за допомогою шунта (табл. 1 та 2), дає близько 23.8 кА, тобто перевищення базового значення на 13 %, що є краще ніж для КР [6]. Для КР визначене за інтегральним методом значення струму без компенсації електростатичного впливу є в 2.76 рази більшим за базове, а з його компенсацією – майже 1.6 рази (табл. 1, 3, 4). Це говорить про значні завадові впливи на КР, що перевіряється, і на необхідність покращення її конструкції та методики експериментів з Ш та КР.

Таблиця 1 – Результати розрахунків амплітуд струмів для КР та Ш

Спосіб оцінки струму	Метод інтегрування			Розрахунок за $R_{ш}$
	КР без компенсації	КР з компенсацією	Шунт	Шунт
Амплітуда струму, кА	58,2	33,7	23,8	21,12



а)

б)

Рисунок 3 – Зареєстрована за допомогою шунта осцилограма струму (а) та графік зміни заряду (б)

Таблиця 2 – Обробка даних, отриманих за допомогою шунта («т.» – точка)

Сигнал, т.	Сигнал без постійної складової, т.	U_{osc} , В	Масштаб K_U , В/т.	Струм, А	$R_{ш}$, Ом	t , мкс	Масштаб K_t , мкс/т.
129	0	0	0,3125	0	0.00185	0	0,306528
181	52	16,25		8783.784		0,306528	
189	60	18,75		10135.14		0,613056	
211	82	25,625		13851.35		0,919583	
217	88	27,5		14864.86		1,226111	
224	95	29,6875		16047.3		1,532639	
231	102	31,875		17229.73		1,839167	
236	107	33,4375		18074.32		2,145694	
242	113	35,3125		19087.84		2,452222	
246	117	36,5625		19763.51		2,75875	
249	120	37,5		20270.27		3,065278	
252	123	38,4375		20777.03		3,371806	
253	124	38,75		20945.95		3,678333	
254	125	39,0625		21114.86		3,984861	
254	125	39,0625		21114.86		4,291389	
254	125	39,0625		21114.86		4,597917	
253	124	38,75		20945.95		4,904444	
251	122	38,125		20608.11		5,210972	
248	119	37,1875		20101.35		5,5175	
245	116	36,25		19594.59		5,824028	

Таблиця 3 – Обробка даних, отриманих за допомогою КР без компенсації («т.» – точка)

Сигнал, т.	Сигнал без постійної складової, т.	U_{osc} , В	Масштаб K_U , В/т.	Час, мкс	Масштаб K_t , мкс/т.
160	0	0	0,0625	0	0,306528
131	29	1,8125		0,306528	
115	45	2,8125		0,613056	
105	55	3,4375		0,919583	
93	67	4,1875		1,226111	
72	88	5,5		1,532639	
61	99	6,1875		1,839167	
54	106	6,625		2,145694	
47	113	7,0625		2,452222	
41	119	7,4375		2,75875	
35	125	7,8125		3,065278	
31	129	8,0625		3,371806	
27	133	8,3125		3,678333	
25	135	8,4375		3,984861	
24	136	8,5		4,291389	
22	138	8,625		4,597917	
23	137	8,5625		4,904444	
24	136	8,5		5,210972	
26	134	8,375	5,5175		
28	132	8,25	5,824028		

Таблиця 4 – Обробка даних, отриманих за допомогою КР інтегральним методом без компенсації та з нею

Без компенсації			З компенсацією		
Час, с	Інтегрування, Кл	Загальні параметри	Час, с	Інтегрування, Кл	Загальні параметри
0	0	$U = 10000$ В	0	0	$U = 10000$ В
3,0653E-07	4,78E-03	$C = 1,13E-05$ Ф	3,0653E-07	2,88E-03	$C = 1,13E-05$ Ф
6,1306E-07	1,12E-02		6,1306E-07	6,72E-03	
9,1959E-07	1,91E-02	$Q = 1,13E-01$ Кл	9,1959E-07	1,14E-02	$Q = 1,13E-01$ Кл
1,22612E-06	2,91E-02		1,22612E-06	1,73E-02	
1,53265E-06	4,12E-02	$k = 4,22E+02$ Кл/точку	1,53265E-06	2,43E-02	$k = 2,41E+02$ Кл/точку
1,83918E-06	5,45E-02		1,83918E-06	3,20E-02	
2,14571E-06	6,86E-02	$t = 3,49E-06$ с	2,14571E-06	4,03E-02	$t = 3,51E-06$ с
2,45224E-06	8,36E-02	$q = 2,03E-01$ Кл	2,45224E-06	4,90E-02	$q = 1,18E-01$ Кл
2,75877E-06	9,94E-02		2,75877E-06	5,81E-02	
3,0653E-06	1,16E-01	$I_m = 5,82E+04$ А	3,0653E-06	6,77E-02	$I_m = 3,37E+04$ А
3,37183E-06	1,33E-01		3,37183E-06	7,75E-02	
3,67836E-06	1,50E-01		3,67836E-06	8,75E-02	
3,98489E-06	1,68E-01		3,98489E-06	9,77E-02	
4,29142E-06	1,85E-01		4,29142E-06	1,08E-01	
4,59795E-06	2,03E-01		4,59795E-06	1,18E-01	
4,90448E-06	2,21E-01		4,90448E-06	1,29E-01	
5,21101E-06	2,38E-01		5,21101E-06	1,39E-01	
5,51754E-06	2,55E-01		5,51754E-06	1,49E-01	
5,82407E-06	2,72E-01		5,82407E-06	1,58E-01	

Висновок і рекомендації. Використання методу інтегрування для котушки Роговського (КР) потребує обов'язкової компенсації електростатичного впливу, якщо він присутній. Значення струмів, отримані методом інтегрування даних, зареєстрованих шунтом та котушкою Роговського з компенсацією електромагнітного впливу (табл. 1), показують, що не можна просто віднімати «хвостове» значення постійної складової для всіх точок осцилограми з КР. Потрібно більш детально проаналізувати електростатичний вплив в інтервали часу з різними полярностями коливань чи можливі інші впливи на КР та її схему реєстрації і розвинути відповідну точнішу методику врахування цих впливів. Відмінність оцінок струмів для шунта за поміряним опором та за інтегральним методом є меншою (в межах 13 %), але теж потребує додаткового аналізу. Зокрема, потрібно додатково проаналізувати конструкцію шунта і коректність врахування при його розробці дії скін-ефекту.

В подальших дослідженнях зазначених питань для отримання більш точних результатів можна також рекомендувати:

1) Реєструвати значення зарядної напруги за допомогою цифрового кіловольтметра, щоби точніше оцінювати величину заряду конденсаторної батареї, яка є базовою для масштабування експериментальних осцилограм.

2) Для співставлення результатів вимірювання за допомогою КР та Ш (визначення амплітуди, відтворення форми імпульсу струму) реєстрацію для кожного імпульсу слід проводити з використанням одночасно і КР, і шунта. Це можна реалізувати, наприклад, застосуванням двох каліброваних USB-осцилографів чи одного двоканального. Тоді не буде додаватися похибка, пов'язана з невеликими відмінностями режимів розрядів (навіть за однакової зарядної напруги), зокрема внаслідок певних розбіжностей умов тригерування проміжку, характеристик каналу розряду та ін.

3) Використовувати конструкцію КР з електростатичним екраном або точніше проробити методику компенсації сторонніх впливів.

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». Укл. В.І. Хомініч.– К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2015. – 67 с.
2. Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств.–М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
4. Испытания и электрофизические установки. Техника эксперимента: Учебное пособие. Авруцкий В. А., Кужекин И. П., Чернов Е. Н. Под ред. И. П. Кужекина. – М.: МЭИ, 1983.–264 с.
5. ДСТУ 3681-98 (ГОСТ 30585-98). Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань.
6. Козлов О. Ю., Шостак В. О. Моделювання генератора імпульсних струмів і порівняння результатів з експериментами // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ: «Політехніка», грудень 2017. С. 607-611.
7. Козлов О. Ю., Шостак В.О. Порівняння зміни в часі струму та інтенсивності світіння каналу імпульсного розряду в повітрі // Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ: «Політехніка», грудень 2017. – с. 598-600.