

УДК 621.314: 621.317.31: 621.373.54

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.102>

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ - ШУМ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З ДАТЧИКАМИ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

Н.А. Шидловська\*, чл.-кор. НАН України, С.М. Захарченко\*\*, докт. техн. наук,

І.Л. Мазуренко\*\*\*, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [snzakhar@ukr.net](mailto:snzakhar@ukr.net)

*Проаналізовано основні методи підвищення відношення корисного сигналу до шуму при вимірюванні імпульсних електричних струмів. Наведено порівняльний аналіз переваг і недоліків основних типів датчиків струму. Описано стенд і методику проведення експериментальних досліджень впливу параметрів вимірювальної системи на рівень шумів і завад при вимірюванні імпульсних електричних струмів. Визначено режими, в яких за лабораторних умов відношення рівня корисного сигналу до шуму найбільше. Розкрито механізм впливу величини активного електричного опору резистивного датчика струму на відношення сигналу до шуму при високій чутливості осцилографа. Експериментально доведено ефективність екранування датчика струму і заземлення його екрану в одних режимах і їх неефективність в інших для підвищення відношення сигналу до шуму. Наведено практичні рекомендації щодо покращення відношення сигналу до шуму в системах з аналоговими датчиками імпульсного струму. Бібл. 39, табл. 2.*

**Ключові слова:** відношення сигнал - шум, датчики імпульсного електричного струму, методи зниження шумів і завад, плазмоерозійна обробка.

**Вступ.** Відношення корисного сигналу до шуму впливає не тільки на достовірність результатів вимірювання, а і на ширину діапазону зміни вимірюваної величини, в якому ці вимірювання можуть бути здійснені з заданою точністю. Це особливо актуально при вимірюванні параметрів імпульсів електричних величин, коли ширина діапазону, а також швидкість їх зміни дуже великі. Одним із прикладів такої ситуації є вимірювання миттєвих значень імпульсних розрядних струмів при плазмоерозійному обробленні гранульованих струмопровідних середовищ [1, 2].

Такі розрядно-імпульсні системи і електромагнітні процеси, що протікають в них, детально описано в багатьох наукових працях [2–15], тому в цій роботі розглядати їх не будемо. Зазначимо лише, що розрядний струм у таких системах є неперіодичним нестационарним сигналом із значною стохастичною амплітудною модуляцією [7, 15, 16], частота якої не є постійною і змінюється у діапазоні від одиниць кілогерц до сотень мегагерц. Динамічний діапазон імпульсів розрядного струму сягає одиниць кілоампер, а швидкість зміни струму становить до сотні ампер за мікросекунду.

Тому підвищення відношення корисного сигналу до шуму при вимірюванні розрядних струмів в таких системах [15–17] є актуальною і важливою задачею, без вирішення якої неможливо досягнути високої точності регулювання параметрів розрядних імпульсів, а значить, і стабілізації параметрів продукції, яка отримується [18–20].

**Метою** даної роботи є аналіз ефективності методів підвищення відношення сигналу до шуму при вимірюванні миттєвих значень імпульсних розрядних струмів при плазмоерозійному обробленні гранульованих струмопровідних середовищ.

**Аналіз основних типів датчиків імпульсних струмів.** Проблема підвищення точності вимірювання миттєвих значень сигналів, які швидко змінюються, з одночасним розширенням динамічних, частотних і часових діапазонів є однією з основних проблем теорії вимірювальних систем. На сьогодні існують наступні основні типи вимірювальних перетворювачів струм – напруга: резистивні датчики, трансформатори струму, диференціюючі трансформатори струму, наприклад, пояс Роговського, магніторезистивні датчики, які працюють на

ефекті Холла, а також трансформатори струму з датчиками Холла і активною компенсацією магнітного поля в осерді. Всі вони мають свої переваги і недоліки.

Резистивні датчики є найбільш простими і забезпечують широкий динамічний і частотний діапазони. На сучасному етапі основні роботи з таким типом датчиків зосереджуються у напрямку підвищення їхньої точності шляхом компенсації магнітного поля струму, що вимірюється за допомогою застосування коаксіальних конструкцій, зменшення температурного коефіцієнта опору та скін-ефекта на високій частоті сигналів за рахунок залучення нових матеріалів і розроблення спеціальних конструкцій [21]. Основним недоліком резистивних датчиків є відсутність гальванічного розв'язання силових кіл об'єкта вимірювання від кіл вимірювальної системи.

Залучення оптичного каналу передачі інформації для усунення цього недоліку навіть із використанням найсучасніших операційних підсилювачів з технологією Rail-to-Rail [22] як по входу, так і по виходу, все одно призводить до спотворення сигналу типу «сходінка» при переході його через нуль, а також до нелінійних спотворень сигналів з малими значеннями. Використання логарифмуючих операційних підсилювачів не завжди є ефективним, оскільки потребує операції антилогарифмування на іншому кінці оптичної лінії, що призводить до накопичення нелінійних спотворень. Крім того, частотний діапазон навіть діодних оптопар обмежений одиницями мегагерц, чого не завжди достатньо.

Трансформатори струму забезпечують гальванічне розв'язання об'єкта вимірювання від вимірювальної системи. Проте вони не забезпечують передачі постійної складової сигналу, мають істотну залежність від частоти як куту зсуву фаз між сигналом, що вимірюється, і сигналом датчика, так і модуля коефіцієнта передачі, а також вони дуже чутливі до шумів і завад електромагнітного поля біля осердя і в ньому. Крім того, через наявність струмів Фуко в осерді питомі витрати енергії в них стрімко збільшуються із зростанням частоти, починаючи із сотень кілогерц, навіть для феритів. У теперішній час основні покращення цього класу датчиків стосуються підвищення точності та зменшення втрат енергії в низькочастотних (50 Гц) потужних трансформаторах струму [23–28], а також розроблення нових магнітом'яких матеріалів з високою магнітною проникністю і малими питомими втратами енергії [29, 30].

Більшість недоліків і переваг трансформаторів струму характерні також і для диференціюючих трансформаторів струму, на кшталт пояса Роговського. Основною перевагою цього типу датчиків є розширення частотного діапазону в область високих частот, оскільки в таких пристроях відсутнє осердя. Основним їх недоліком є необхідність інтегрування отриманого сигналу, що, зважаючи на його складну форму і зміну тривалості та частоти повторення в широких межах, становить значну проблему.

Магніторезистивні датчики, які працюють на ефекті Холла, наприклад, прилади фірм Honeywell, Allegro та інших [31, 32], мають змогу організувати гальванічне розв'язання вхід – вихід, але на сьогоднішній день не дозволяють вимірювати струми вище 100 А. Крім того, їх точність і швидкодія залишають бажати кращого. З аналізу областей їх застосування і світових тенденцій розвитку у найближчій перспективі малоймовірно очікувати на розширення їх динамічного діапазону до 1000...2000 А і частотного до 500...1000 кГц.

Найбільш перспективними, на нашу думку, є трансформатори струму з датчиками Холла [32] і активною компенсацією магнітного поля в осерді, наприклад, фірм LEM, HCS та інш. [33, 34]. Основним недоліком цих датчиків є значний (приблизно 1 мкс) час відгуку і відносно невеликий (приблизно 150 кГц) частотний діапазон у випадку безперервного сигналу. Датчики такого типу за рахунок динамічної компенсації магнітного поля в осерді дозволяють зменшити в номінальному режимі похибку вимірювання до 0,3 %. Але ще потрібно докласти зусиль для розширення їх частотного діапазону, хоча б при вимірюванні імпульсних сигналів.

Відомі також інтелектуальні струмові пробники для осцилографів фірм Tektronix, LeCroy, Keysight та Siglent на основі датчиків останнього типу, які дають змогу вимірювати синусоїдні струми з діючим значенням до 500 А і частотою до 5 МГц [35, 36]. Але на сього-

днішній день їх вартість на порядок перевищує вартість цифрового запам'ятовуючого осцилографа середнього класу.

Із аналізу основних типів датчиків струму випливає, що у переважній їх більшості вимірювальним перетворювачем струм – напруга є резистивний елемент. Датчики струму на основі трансформаторів струму внаслідок відносно великих розмірів котушок і осердя в разі його наявності, а також великої кількості витків котушок більш вразливі до впливу електромагнітних випромінювань у радіочастотному діапазоні, ніж датчики інших типів. Тому для аналізу впливу шумів на вимірювальну систему для більшості випадків достатньо дослідити їх вплив на систему з резистивним датчиком струму і елементами, які подібно антенам здатні вловлювати ефірні електромагнітні завади.

**Опис експериментального стенда досліджень.** Оцінювання рівнів електромагнітних шумів і завад відбувалося за даними прямих експериментів на експериментальному лабораторному стенді, до складу якого входили:

1. Цифровий запам'ятовуючий осцилограф Siglent SDS1104CFL, полоса пропускання якого становила 100 МГц;
2. Стандартний щуп осцилографа з коефіцієнтом передачі 1:1;
3. Вимірювальні резистори типу МЛТ-2 з номінальними опорами 20, 47, 51 та 110 Ом, а фактичними: 19,5, 45, 51,1 та 108,5 Ом відповідно.

Такі значення опору було вибрано з наступних причин. По-перше, згідно з паспортними даними вимірювального трансформатора струму з датчиком Холла марки HCS-SH-1000A, який планується для використання в установці імпульсного плазмоерозійного очищення поверхневих природних вод, максимальне значення опору вимірювального резистора, якщо напруга двополярного джерела живлення становить  $\pm 24$  В, для вимірювання струмів амплітудою до 2000 А не повинно перевищувати 21 Ом [37]. Цим зумовлений вибір першого номіналу опору вимірювального резистора 20 Ом. По-друге, в лабораторних умовах амплітуда струму в установці імпульсного плазмоерозійного очищення поверхневих природних вод у разі тривалості його імпульсу до 5 мкс зазвичай не перевищує 400 А. В цьому випадку для підвищення відношення сигналу до шуму на вимірювальному резисторі значення його опору доцільно збільшити пропорційно 2000 А / 400 А, тобто у 5 разів. Цим обумовлено друге значення опору вимірювального резистора.

Резистори типу МЛТ було вибрано тому, що серед металооксидних резисторів вони мають одні з найгірших показників щодо власних шумів, температурного коефіцієнта опору і точності. Тому результати, отримані з використанням металооксидних, металоплівкових або товстоплівкових резисторів інших типів гарантовано будуть не гірше отриманих з використанням резисторів типу МЛТ.

**Методика експериментів.** На першому етапі експериментів досліджувався вплив елементів системи осцилограф – вимірювальний щуп – вимірювальний резистор – антена – екран на рівень вимірюваних шумів у ній.

Вимірювальні резистори по черзі під'єднувались до стандартного вимірювального щупу осцилографа з коефіцієнтом передачі 1:1 так, щоб його затискачі були розташовані максимально близько до тіла резистора, а площа контура, який при цьому утворюється, була мінімально можливою. Провід щупа був розпрямлений, а резистор знаходився на максимально можливому віддаленні від осцилографа, щоб зменшити вплив електромагнітних завад від імпульсного джерела живлення та інших перетворювальних блоків осцилографа на вимірювальний резистор. З цією ж метою вся інша радіоелектронна та електротехнічна апаратура в лабораторії була вимкнена.

Для оцінки впливу електромагнітних завад на вимірювання сигналів мікросекундної та субмікросекундної тривалості розгортка осцилографа була 500 нс/под. Для контролю наявності низькочастотних (порядку 50 Гц) електромагнітних завад розгортку осцилографа перемикали на значення 10 мс/под. Переконавшись, що розмахи від піку до піку  $U_{pp}$  (подвійна амплітуда) електромагнітних завад в обох випадках майже не відрізнялися, вимірювання продовжували, встановивши значення розгортки 500 нс/под. Вимірювання проводились як з екрануванням резисторів у незаземленому і заземленому сейфі з товщиною сталевих стінок

2 мм, так і без їхнього екранування за різних значень ціни поділки екрана осцилографа  $C$  – від 2 до 200 мВ/под. Чутливість осцилографа  $Ч$  є обернено пропорційною до ціни поділки його екрана  $Ч = 1/C$ . Отримані значення розмаху напруги електромагнітних завад  $U_{pp}$ , вимірюваного у поділках екрана осцилографа за різних значень його чутливості  $Ч$ , амплітуди напруги електромагнітних завад  $U_m = 0,5 \cdot U_{pp} C$ , амплітуди завад у разі дотику до дроту щупа, який з'єднаний з корпусом осцилографа  $U_{mk}$ , амплітуди завад у разі дотику до сигнального дроту щупа  $U_{ms}$ , амплітуди завад у випадку екранування резистора у незаземленому  $U_{me}$ , а також у заземленому сейфі  $U_{mez}$  наведено у табл. 1.

На другому етапі експериментів досліджувався вплив елементів системи осцилограф – вимірювальний трансформатор струму – екран на рівень вимірюваних шумів у ній. Для цього використовувались два вимірювальних трансформатора струму. Перший трансформатор був неекранованим і мав  $w = 320$  витків мідного дроту на кільцевому феритовому осерді марки 2000НМ типорозміру К45х28х12. Він був навантажений на резистор типу С2-14 опором при температурі 25 градусів Цельсія 1,023 Ом. Другий трансформатор струму був поміщений до коробки із фольгованого з одного боку стеклотекстоліту з товщиною мідної фольги 35 мкм, зробленої таким чином, щоб навколо трансформатора був екран. Другий трансформатор мав  $w = 860$  витків мідного дроту на кільцевому феритовому осерді марки 2000НМ типорозміру К38х19х24. Він був навантажений на резистор типу С2-14 опором при температурі 25 градусів Цельсія 1,014 Ом. Отримані результати вимірювань шумів і завад у системі з трансформаторами струму наведено в табл. 2.

**Результати вимірювань та їх обговорення.** Результати вимірювань у системі вимірювальний резистор – щуп осцилографа – осцилограф наведено у табл. 1.

Зауваження.

При відсутності вимірювального резистора ( $R_B = \infty$ ) на частоті 50 Гц у незаземленому сейфі амплітуда шумів може бути вищою, ніж взагалі без сейфа. Дверця незаземленого сейфа можуть працювати як дзеркало, збільшуючи рівень шумів під певним кутом розкриття. Заземлення сейфа зменшує амплітуду шумів на частоті 50 Гц за високих значень чутливості осцилографа, якій відповідають значення ціни поділки його екрана до 20 мВ/под.

У разі дотику до сигнального дроту щупа осцилографа без вимірювального резистора біля незаземленого сейфа амплітуда шумів та завад на частоті 50 Гц зростає від 10 до 400 мВ.

У випадку, коли  $R_B = 45$  Ом і чутливість осцилографа відповідає ціни поділки 2 мВ/под., дотик корпусного дроту щупа до заземленого сейфа підвищує рівень шумів і завад з 0,4 до 3,8 мВ, що більше, ніж у разі дотику рукою.

При зменшенні чутливості осцилографа до значень, які відповідають значенням ціни поділки його екрана більше 100 мВ/под. все одно шуми і завади становлять приблизно 0,05...0,1 поділки, що збільшує адитивну складову шумів із зменшенням чутливості у цьому діапазоні. Зображення шумів майже зникає лише при найнижчій чутливості, якій відповідає ціна поділки екрана осцилографа 5 В/под. Тому робота за чутливістей, яким відповідають значення ціни поділки екрана осцилографа 0,5...1 В/под. включно, серед всіх досліджених спричиняє найбільші питомі шуми і завади, знижує відношення сигнал / шум і не рекомендована.

Для найбільшого відношення сигнал / шум амплітуда корисного сигналу повинна бути достатньою для роботи за чутливості, якій відповідає ціна поділки 5 В/под., тобто не менше 0,5 В. Якщо значення вимірювального резистора  $R_B = 20$  Ом, такий сигнал викликає амплітуда вхідного струму  $I_{1m} = 0,5 \cdot 5000/20 = 125$  А. Якщо значення  $R_B = 100$  Ом, такий сигнал викликає амплітуда вхідного струму  $I_{1m} = 0,5 \cdot 5000/100 = 25$  А, а якщо значення  $R_B = 200$  Ом – амплітуда вхідного струму  $I_{1m} = 0,5 \cdot 5000/200 = 12,5$  А.

Таблиця 1

Опір вимірювального резистора $R_B$ , Ом	Ціна поділки екрана осцилографа $C$ , мВ/под.	Розмах шумів і завад $U_{pp}$ , под.	Амплітуда шумів і завад $U_m$ , мВ	Амплітуда шумів і завад у разі дотику до корпусного дроту $U_{mk}$ , мВ	Амплітуда шумів і завад у разі дотику до сигнального дроту $U_{ms}$ , мВ	Амплітуда шумів і завад у разі екранування резистора у сейфі без заземлення $U_{me}$ , мВ	Амплітуда шумів і завад у разі екранування резистора у сейфі із заземленням $U_{mez}$ , мВ		
19,5 (15.08.2019)	2	0,8	0,8	2	4	1,2	1,2		
	5	1,2	3	7,5	8,5	5	5		
	10	0,6	3	8	9	5	5		
	20	0,3	3	8	9	5	5		
	50	0,2	5	8	8	5	5		
	100	0,1	5	8	8	5	5		
	200	0,1	10	10	10	10	10		
45	2	1,8	1,8	3,4	4	0,8	1		
	5	0,8	2	3,5	4	4	4,8		
	10	0,4	2	4	5	4	4		
	20	0,2	2	4	5	4	4		
	50	0,1	2,5	4	5	5	4		
	100	0,1	5	5	5	5	4		
	200	0,05	5	5	5	5	4		
51,1 (15.08.2019)	2	1,4	1,4	2,4	4,4	0,6	0,8		
	5	0,5	1,25	3,5	3,5	2,5	3,5		
	10	0,3	1,5	3	3	3	4		
	20	0,2	2	3	3	3	4		
	50	0,1	2,5	3	3	5	5		
	100	0,1	5	5	5	5	5		
	200	0,05	5	5	5	5	5		
51,1 (19.08.2019)	2	0,6	0,6	1,4	1,8	0,6	1		
	5	1,2	3	6	7	2,5	5		
	10	0,5	3	6	7	2,5	5		
	20	0,3	3	8	8	3	5		
	50	0,15	3,75	8	8	4	5		
	100	0,1	5	8	8	5	5		
	200	0,1	10	10	10	10	10		
108,5 (19.08.2019)	2	0,6	0,6	2,4	8	1	1		
	5	0,8	2	4	7	4,5	4		
	10	0,4	2	4	7	4,5	4		
	20	0,2	2	4	8	5	4		
	50	0,1	2,5	4	8	5	5		
	100	0,1	5	5	8	5	5		
	200	0,1	10	10	10	10	10		
∞ Нескінченність (розімкнуті контакти)	2	1,2	1,2	0,8	8	ВЧ 0,6	50Гц 7	ВЧ 0,6	50Гц 0,6
	5	1,4	3,5	2,5	20	1,5	7,5	2	2
	10	0,8	4	2,5	12	6	10	2	2
	20	0,2	2	2	12	3	10	2	2
	50	0,1	2,5	2,5	10	2,5	10	2	2
	100	0,1	5	5	10	2,5	10	2	2
	200	0,1	10	10	10	10	10	2	2

Результати вимірювань у системі трансформатор струму – вимірювальний резистор – коаксіальний кабель – осцилограф наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Датчик струму	Ціна поділки екрана осцилографа $C$ , мВ/под.	Розмах шумів і завад $U_{pp}$ , под.	Амплітуда шумів і завад $U_m$ , мВ	Амплітуда шумів і завад при екрануванні датчика у сейфі без заземлення $U_{me}$ , мВ	Амплітуда шумів і завад при екрануванні датчика у сейфі із заземленням $U_{mez}$ , мВ
Неекранований $w=320$ витків, $R_M=1,023 \text{ Ом}$	2	1,6	1,6	2,4	2,2
	5	3	7,5	8,5	7,5
	10	1,4	7	8	8
	20	0,8	8	8	8
	50	0,3	7,5	10	8
	100	0,15	7,5	10	8
	200	0,15	15	15	15
	500	0,1	25	25	25
	1000	0,05	25	25	25
	2000	0,05	50	50	50
Неекранований $w=860$ витків, $R_M=1,013 \text{ Ом}$	2	1,6	1,6	1,8	1,8
	5	2,6	6,5	10	8
	10	1,2	6	10	8
	20	0,5	5	10	8
	50	0,3	7,5	12,5	8
	100	0,15	7,5	15	8
	200	0,15	15	25	15
	500	0,1	25	25	25
	1000	0,05	25	25	25
	2000	0,05	50	50	50
5000	0,05	125	125	125	

### Аналіз результатів експериментів.

1. З аналізу результатів експериментів, які наведено в табл. 1, випливає наступне.

1.1. Рівень електромагнітних шумів і завад у системі вимірювальної резистор – стандартний щуп осцилографа – цифровий запам'ятовуючий осцилограф залежить не тільки від відповідних рівнів описаних вище величин в ефірі на момент проведення дослідів, а також і від власних шумів осцилографа та ефективності їх придушення за різних значень чутливості каналу підсилення сигналу та інтерференційних явищ в системі.

1.2. У режимі найбільшої чутливості осцилографа, якому відповідає ціна поділки  $2 \text{ мВ/под.}$ , найбільш яскраво спостерігається залежність амплітуди шумів і завад від електричного опору вимірювального резистора. За одних і тих самих умов у режимі без екранування і дотику людини до щупу осцилографа найменші рівні шумів і завад  $0,6 \text{ мВ}$  спостерігаються у разі його значення  $51,1 \text{ Ом}$ . При його зменшенні до  $19,5 \text{ Ом}$  цей рівень підвищується до  $0,8...2 \text{ мВ}$ . Аналогічно у разі збільшення опору резистора до  $108,5 \text{ Ом}$  рівень шумів і завад збільшується до  $1,4 \text{ мВ}$ . При відсутності вимірювального резистора (коли він має нескінченний опір) амплітуда шумів і завад становила  $1,2 \text{ мВ}$ . Ймовірно мінімальне значення шумів і завад, яке відповідає значенню опору вимірювального резистора, найбільш близькому до хвильового опору кабелю осцилографа ( $50 \text{ Ом}$ ), пов'язане з мінімумом для цього значення опору інтенсивності інтерференційних явищ, викликаних відбиванням електромагнітних хвиль від кінців коаксіального кабелю у випадку неузгодженості опорів навантаження і джерела з його хвильовим опором. Неузгодженість хвильового опору коаксіального кабелю з опором вимірювального резистора, як свідчать дані табл. 1, може підвищити рівень шумів і завад у системі, яка досліджувалась, до 3,3 раз. Тією чи іншою мірою це явище продовжує спостерігатися при зниженні чутливості осцилографа до рівня, якому відповідає значення ціни поділки аж до  $200 \text{ мВ/под.}$

1.3. Вплив опору вимірювального резистора на рівень його теплових шумів. Відомо, що діюче значення напруги так званих «теплових» шумів або шумів Джонсона ідеального резистора обчислюється за формулою [38]:

$$U_{NT} = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (1)$$

де  $k$  – постійна Больцмана, яка дорівнює  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – абсолютна температура резистивного шару, К;  $R$  – електричний опір резистора, Ом;  $\Delta f$  – полоса частот, в якій досліджуються шуми, Гц.

У нашому випадку  $T = 300$  К,  $\Delta f = 10^8$  Гц і для  $R = 20$  Ом  $U_{NT} = 5,76$  мкВ, а для  $R = 110$  Ом  $U_{NT} = 13,5$  мкВ. Як бачимо, теплові шуми резисторів у розглянутих умовах на 2 – 3 порядки менше сумарних шумів, виміряних осцилографом. Тому вони не є визначальними і немає протиріччя між збільшенням теплових шумів згідно з формулою (1) при збільшенні опору резистора і фактичним зменшенням сумарних шумів при збільшенні опору вимірювального резистора від 19,5 до 51,1 Ом.

1.4. Екранування щупу осцилографа з вимірювальним резистором у сталевому сейфі без заземлення при найвищій чутливості осцилографа в окремих випадках дає ефект до 2,5 разів, але у більшості випадків майже ніякого ефекту не спостерігається, особливо при зниженні чутливості осцилографа до рівня, якому відповідають значення ціни поділки 20 мВ/под. і більше. Це нашоє на думку, що в таких випадках вимірювальний резистор і щуп осцилографа не є головним джерелом шумів і завад у системі, яка досліджується.

1.5. Заземлення сейфа, як свідчать дані табл. 1, не завжди сприяє зниженню рівня шумів і завад. Ефект від заземлення сейфа стає більш-менш помітним за низьких значень чутливості осцилографа, яким відповідають значення ціни поділки його екрана 100...200 мВ/под., що підтверджує гіпотезу про те, що за розглянутих умов вимірювальний резистор не є основним джерелом шумів і завад у системі.

1.6. Дотик людини до сигнального дроту щупа осцилографа у розглянутих умовах до 5 разів збільшує рівень шумів і завад у системі при найвищій чутливості осцилографа, якій відповідає ціна поділки його екрану 2 мВ/под. При зниженні чутливості осцилографа до рівня, якому відповідає ціна поділки його екрану 200 мВ/под., це явище майже нівелюється, що свідчить про те, що із зменшенням чутливості осцилографа основним джерелом шумів і завад в системі не є вимірювальний резистор.

1.7. Дотик людини до дроту щупа осцилографа, який з'єднаний з його корпусом у описаних умовах збільшує амплітуду шумів і завад до 2,5 разів, що найбільш яскраво видно при високих значеннях чутливості осцилографа, якій відповідає значення 2 мВ/под ціни поділки його екрану. При подальшому зниженні чутливості аж до рівня, якому відповідає ціна поділки екрану 200 мВ/под., це явище у переважній більшості випадків нівелюється. У середньому збільшення рівня шумів і завад при дотику людини до сигнального дроту щупа осцилографа приблизно у 2 рази більше, ніж при дотику до дроту, з'єданого з корпусом. Таким чином, рекомендації [39] з'єднувати якнайбільше струмопровідних областей на друкованій платі і частин корпусу перетворювача з корпусом осцилографа не завжди доречні. Це має сенс лише у випадку надійного заземлення корпусів як осцилографа, так і вимірювального перетворювача, яке забезпечує однакові потенціали обплетення коаксіального кабелю на обох його кінцях, що не завжди можна реалізувати на практиці. Беззаперечною лишається рекомендація зменшення розмірів струмопровідних частин перетворювача, які з'єдані не тільки з сигнальним дротом кабелю, але і з його обплетенням.

1.8. Вплив чутливості осцилографа на виміряну амплітуду шумів і завад. Найбільші виміряні значення шумів спостерігаються за найнижчої чутливості осцилографа. Навіть за низької чутливості осцилографа, якій відповідає значення ціни поділки його екрана 200 мВ/под., вони завжди мають найменший, який може розрізнити око, рівень (приблизно 0,05 частки поділки осцилографа). Логічно, що за фіксованого рівня зображення шумів на екрані осцилографа із зменшенням його чутливості їх виміряне значення пропорційно збільшується.

Таким чином, якщо позначити висоту зображення власних шумів на екрані осцилографа  $L_{NO}(t)$ , напругу шумів у ефірі  $u_{NE}(t)$ , напругу корисного сигналу  $u_S(t)$ , а чутливість осци-

логафа  $Ч$ , то висота зображення сумарного сигналу на екрані осцилографа у першому наближенні для лінійних систем можна записати у вигляді:

$$L_{\Sigma}(t) = L_{NO}(t) + Ч \cdot (u_S(t) + u_{NE}(t)). \quad (2)$$

Враховуючи, що напруга сумарного сигналу пов'язана з висотою його зображення на екрані осцилографа простим співвідношенням  $u_{\Sigma}(t) = L_{\Sigma}(t)/Ч$ , формулу (2) перепишемо у вигляді:

$$u_{\Sigma}(t) = L_{NO}(t)/Ч + u_S(t) + u_{NE}(t). \quad (3)$$

Отже, з (3) випливає, що сумарний сигнал крім корисного сигналу включає в себе мультиплікативну і адитивну складові сигналу шумів, а адитивна складова шумів зменшується зі зростанням чутливості осцилографа, тобто є найменшою у разі його максимального підсилення. Тому у випадку, якщо канал передачі інформації від датчика до осцилографа захищений від завад, а підсилювач осцилографа має малі власні шуми і спотворення, немає сенсу застосовувати додатковий підсилювач сигналу безпосередньо після датчика перед входом осцилографа.

2. З аналізу результатів експериментів, які наведено в табл. 2, випливає наступне.

2.1. Результати аналізу, отримані для системи з вимірювальними резисторами, справедливі також і для системи з вимірювальними трансформаторами струму.

2.2. Амплітуда шумів у системі з трансформаторами струму при значеннях чутливості, яким відповідає ціна поділки екрану осцилографа до  $200 \text{ мВ/под.}$ , як правило, у  $1,5 \dots 2,5$  рази більша, ніж в системі з вимірювальними резисторами, оскільки трансформатор струму в якості антени, яка вловлює електромагнітні завади, набагато ефективніший за резистор.

2.3. За високих значень чутливості осцилографа, яким відповідає ціна поділки його екрана до  $20 \text{ мВ/под.}$  включно амплітуда шумів і завад на екранованому трансформаторі у  $1,2 - 1,6$  рази нижча, ніж на неекранованому. У разі зниження чутливості осцилографа до значень, яким відповідають значення ціни поділки його екрана від  $50$  до  $5000 \text{ мВ/под.}$ , різниця між шумами на екранованому і неекранованому трансформаторах струму практично відсутня.

2.4. Екранування обох трансформаторів у сейфі не дає позитивного ефекту. Більш того, за високих значень чутливості осцилографа, яким відповідають значення поділки його екрана від  $2$  до  $10 \text{ мВ/под.}$ , амплітуда шумів у сейфі може бути незначно вищою, ніж у випадку без екранування у сейфі.

2.5. Заземлення сейфа з трансформаторами струму при високій чутливості осцилографа, якій відповідають значення ціни поділки екрана осцилографа аж до  $500 \text{ мВ/под.}$ , призводить до зниження амплітуди шумів у системі з трансформаторами струму у  $1,2 \dots 1,8$  раз. При подальшому зниженні чутливості осцилографа, якій відповідають значення ціни поділки його екрана аж до  $5000 \text{ мВ/под.}$ , заземлення сейфа не сприяє зниженню шумів у системі.

**Висновки і рекомендації.** 1. Шуми і завади в системі датчик струму – канал передачі сигналу – осцилограф містять не лише мультиплікативну, а і адитивну складові. В описаних умовах проведення досліджень, як правило, адитивна складова шумів перевищує мультиплікативну в умовах зниження чутливості осцилографа, якій відповідає значення ціни поділку його екрана до  $200 \text{ мВ/под.}$  Тому для більшості датчиків, рівень корисного сигналу яких перевищує десятки – сотні мілівольт, у випадку захищеного від завад каналу передачі даних і використання осцилографа з малим рівнем власних шумів підсилювача немає сенсу застосовувати додатковий попередній підсилювач сигналу, включений між датчиком і каналом передачі сигналу.

2. Інтерференційні явища в каналі передачі сигналів, які виникають у разі неузгодженості опорів навантаження і джерела сигналу з хвильовим опором каналу в описаних умовах можуть до  $3,3$  раз підвищувати амплітуду шумів у системі при високій чутливості осцилографа, якій відповідає ціна поділки його екрана  $2 \text{ мВ/под.}$  При зниженні чутливості осцилографа до значень, яким відповідають значення ціни поділки його екрана до  $50 \text{ мВ/под.}$  і більше, це явище нівелюється адитивною складовою шумів і може не враховуватись. Тобто при



рівнях корисного сигналу датчика десятки – сотні мілівольт і вище узгодження опорів складових системи з хвильовим опором каналу передачі сигналів не обов'язкове.

3. Ефект зниження шумів у системі при екрануванні датчиків спостерігається лише за умов високої чутливості осцилографа, якій відповідають значення ціни поділки його екрана не більше 100 мВ/под. При подальшому зниженні чутливості адитивна складова шумів і завад у системі значно перевищує мультиплікативну і стає визначаючою. Тому за умови рівня корисного сигналу датчика сотні мілівольт його екранування не обов'язкове.

4. Додаткове заземлення екрана датчика у досліджених умовах при відсутності значних електромагнітних завад є ефективним тільки при дуже високій чутливості осцилографа, якій відповідає значення ціни поділки його екрана не більше 5 мВ/под. Заземлення обплетення кінця каналу передачі сигналу, з'єднаного з екраном датчика повинно бути дуже надійним і забезпечувати різницю потенціалів на кінцях обплетення кабелю в 3...5 разів меншу за рівень шумів датчика. Якщо ці умови не виконуються, додаткове заземлення не дає корисного ефекту, а у випадку великого опору дроту заземлення у точці з'єднання з екраном датчика може призвести до збільшення рівня шумів і завад у системі.

5. Під'єднання масивних струмопровідних частин корпусу або друкованої плати систем датчика до обплетення кабелю, який з'єднує датчик з входом осцилографа, є корисним тільки у випадку, коли падіння потенціалу на обплетенні кабелю в 3...5 разів менше напруги шумів і завад на датчику. Це можливо, наприклад, у разі надійного заземлення корпусів як осцилографа, так і вимірювального перетворювача, яке забезпечує однакові потенціали обплетення коаксіального кабелю на обох його кінцях, що не завжди можна реалізувати на практиці. Натомість зменшення розмірів струмопровідних частин перетворювача, які з'єднані не тільки з сигнальним дротом кабелю, але і з його обплетенням, завжди позитивно впливає на зменшення рівня шумів і підвищення відношення сигнал / шум.

1. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. No 61. Pp.105–115.
2. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Анализ электромагнитных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмозероэрозийной нагрузки при изменении их параметров в широких диапазонах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>
3. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Циклические переходные процессы в цепях электроразрядных установок с учетом влияния скорости нарастания разрядных токов и паузы между ними на сопротивление нагрузки. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>
4. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23–25.
5. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н. Переходные процессы в RLC-цепях с параметрической нагрузкой. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 3–10.
6. Захарченко С.Н. Физическая модель гранулированной токопроводящей среды. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 6. С. 19–26.
7. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Параметрична модель опору плазмозерозійного навантаження, адекватна в широкому діапазоні змін прикладеної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.003>
8. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 6. С. 3–17.
9. Shydlovska N., Zakharchenko S., Cherkaskyi O. The influence of electric field parameters and temperature of hydrosols of metals' plasma-erosive particles on their resistance and permittivity. *Computational problems of electrical engineering*. 2014. Vol. 4, No 2. Pp. 77–84.
10. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н. Моделирование процессов в цепи разряда конденсатора на искрозероэрозийную нагрузку. *Електронне моделювання*. 2012. Т. 34, № 6. С. 73–81.
11. Захарченко С.Н. Влияние напряженности внешнего электрического поля и температуры на сопротивление искрозероэрозийных гидрозолей металлов. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 113–120.

12. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 2. С. 10–14.
13. Захарченко С.М. Статистичні дослідження еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при його електроерозійній обробці на прикладі гранул алюмінію у воді. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. №1 (133). С. 62–67.
14. Kornev J.I., Yavorovsky N.A., Saveliev G.G., Galanov A.I., Zaharchenko S.M., Perekos A.E., Danilenko N.B., Yurmazova T.A. Physico-chemical Processes in Electric Discharges in Liquid Media. *Proc. of 15th International Symposium on High-Current Electronics (15th SHCE)*. Tomsk, Russia, September 21–26, 2008. P. 480–483.
15. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>
16. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Порівняння ефективності згладжування сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому багатоітераційними методами фільтрації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.003>
17. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Критерії необхідної та достатньої кількості ітерацій фільтрації неперіодичних нестационарних сигналів багатоітераційними методами. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.023>
18. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко М.І., Монастирський Г.Є., Перетятко Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск Силова електроніка та енергоефективність*. 2006. Ч. 1. С. 120–123.
19. Захарченко С.Н., Руденко Ю.В., Черкасский А.П. Повышение точности регулирования напряжения на емкостных накопителях энергии систем импульсной плазмозерозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.030>
20. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекос А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатко К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозийных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6, № 5 (60). С. 66–72.
21. Тесик Ю.Ф., Комаров М.С., Клименко Д.М. Вимірювач миттєвого струму в пристроях силової електроніки. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 36. С. 133–138.
22. Xiyao Zhang. Когда использовать усилитель с rail-to-rail входами и на что обращать внимание. *Радиолоцман*. 2016. № 9 (64). С. 22–24. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=179990> (дата обращения 02.10.2019).
23. Варский Г.М. Измерительный преобразователь тока с электронной компенсацией погрешности. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 24. С. 119–125.
24. Варский Г.М. Влияние межобмоточной емкости на точность работы высоковольтного трансформатора тока. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 58–60.
25. Варский Г.М., Гречко В.В., Танкевич Е.Н. Определение параметров электромагнитной системы электронного трансформатора тока с нормируемыми метрологическими характеристиками в переходных режимах работы. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2015. Вип. 42. С. 129–135.
26. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Паньків В.І., Танкевич Є.М. Математична модель трансформатора струму на основі теорії феромагнітного гістерезису Джайлса-Атертона. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 58–65.
27. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Паньків В.І., Танкевич Є.М. Фактори, що визначають виникнення та значення залишкової індукції в магнітопроводах трансформаторів струму в умовах експлуатації. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 43. С. 5–13.
28. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. Москва: ИП РадиоСофт, 2005. 320 с.
29. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 384 с.
30. Герцик О.М., Переверзева Т.Г., Ковбуз М.О., Бойчишин Л.М., Носенко В.К., Борисюк А.К. Електричні та магнетні властивості багатокомпонентних аморфних металевих композицій на основі заліза. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2017, т. 39, № 8, С. 1023–1033. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.08.1023>
31. Маргелов А. Датчики тока компании Honeywell. Электронные компоненты. 2007. № 7. С. 121–126. URL: [http://esworld.ru/media/bip/pdfs/margelov\\_es307.pdf](http://esworld.ru/media/bip/pdfs/margelov_es307.pdf) (дата обращения 02.10.2019).
32. Таранов С.Г., Тесик Ю.Ф., Брайко В.В., Карасинский О.Л., Шувалов Г.И., Пронзалева С.Ю. Принципы построения преобразователей тока на основе датчиков Холла. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 35. С. 96–107.

33. Изолированные датчики тока и напряжения производства ООО «ТВЕЛЕМ» Характеристики – Применение – Расчеты. URL: [http://www.efo-power.ru/BROSHURES\\_CATALOGS/LEM/TVELEM\\_rus.pdf](http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/TVELEM_rus.pdf) (дата обращения 02.10.2019).
34. Джоблин Д. Новые датчики тока прямого усиления, сравнимые по характеристикам с компенсационными. *Силовая Электроника*. 2014. № 6. С. 66–69. URL: <https://www.lem.com/ru/file/4469/download> (дата обращения 03.10.2019).
35. Keysight N2780B Series AC/DC Current Probes A wide selection of current probes to meet your application's needs. Data Sheet. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-6432EN.pdf> (дата обращения 03.10.2019).
36. SDS1000X, SDS1000X+ Series. Digital Oscilloscope. DataSheet-2016.05. URL: <http://www.amt.cz/info/1/SDS1000XPLUS.pdf> (дата обращения 03.10.2019).
37. Data Sheet. Hall Effect Current Sensor. HS-SCH: NP. URL: <http://coretech.com.ua/docs/Sensors-hall/coretech-HCS-SH.pdf> (дата обращения 03.10.2019).
38. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуаций параметров: Электронное учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 85 с. URL: [http://www.lib.unn.ru/students/src/Yakimov\\_Noise.pdf](http://www.lib.unn.ru/students/src/Yakimov_Noise.pdf) (дата обращения 03.10.2019).
39. Горшков Б.Л. Методы практического конструирования при нормировании сигналов датчиков. По материалам семинара «Practical design techniques for sensor signal conditioning». Москва: ЗАО АВТЭКС, 2014. 311 с. URL: [http://www.autex.spb.su/download/seminar/ad/sensor99rus/s\\_11.pdf](http://www.autex.spb.su/download/seminar/ad/sensor99rus/s_11.pdf) (дата обращения 03.10.2019).

УДК 621.314: 621.317.31: 621.373.54

#### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ - ШУМ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ДАТЧИКАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ**

**Н.А. Шидловская**, чл.-корр. НАН Украины, **С.Н. Захарченко**, докт. техн. наук, **И.Л. Мазуренко**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

*В работе проанализированы основные методы повышения отношения полезного сигнала к шуму при измерении импульсных электрических токов. Приведен сравнительный анализ достоинств и недостатков основных типов датчиков тока. Описаны стенд и методика проведения экспериментальных исследований влияния параметров измерительной системы на уровень шумов и помех при измерении импульсных электрических токов. Определены режимы, в которых в лабораторных условиях отношение уровня полезного сигнала к шуму наибольшее. Раскрыт механизм влияния величины активного электрического сопротивления резистивного датчика тока на отношение сигнала к шуму при высокой чувствительности осциллографа. Экспериментально доказана эффективность экранирования датчика тока и заземления его экрана в одних режимах и их неэффективность в других для повышения отношения сигнала к шуму. Приведены практические рекомендации по улучшению отношения сигнала к шуму в системах с аналоговыми датчиками импульсного тока. Библи. 39, табл. 2.*

**Ключевые слова:** отношение сигнала к шуму, датчики импульсного электрического тока, методы снижения шумов и помех, плазмозероизонная обработка.

#### **ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF METHODS FOR INCREASING THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN MEASURING SYSTEMS WITH PULSED CURRENT SENSORS**

**N.A. Shydlovska, S.M. Zakharchenko, I.L. Mazurenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*In the paper the main methods of increasing the ratio of the useful signal to noise when measuring pulsed electric currents are analyzed. A comparative analysis of the advantages and disadvantages of the main types of current sensors is given. The test bench and the methodology for experimental studies of the influence of the parameters of the measuring system on the level of noise and disturbance when measuring pulsed electric currents are described. Modes in which in laboratory conditions the ratio of the level of the useful signal to noise is greatest are determined. The mechanism of the influence of the value of the active electrical resistance of a resistive current sensor on the signal-to-noise ratio at a high sensitivity of the oscilloscope is disclosed. The efficiency of shielding the current sensor and its grounding in some modes and their inefficiency in others to increase the signal-to-noise ratio has been experimentally proved. Practical recommendations for improving the signal-to-noise ratio in systems with analog pulse current sensors are given. References 39, tables 2.*

**Key words:** signal-to-noise ratio, pulsed electric current sensors, noise and disturbance reduction techniques, plasma-erosion treatment.

1. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. No 61. Pp.105–115.
2. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. The Analysis of Electromagnetic Processes in Output Circuit of the Generator of Discharge Pulses with Non-linear Model of Plasma-erosive Load at Change Their Parameters in Wide Ranges. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 87–95. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Cyclic transients in the circuits of electric discharge installations taking into account the influence of magnitude and rate of discharge currents rise on resistance of electric spark load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 3–10 (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>
4. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load taking into account its changes during discharge current flowing in the load and at zero current in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23–25 (Rus)
5. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M. Transients in RLC-circuits with a parametric loading. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 2. Pp. 3–10. (Rus)
6. Zakharchenko S.M. Physical Model of the Granulated Current-carrying Medium. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 6. – Pp. 19–26. (Rus)
7. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Parametric Model of Plasma-erosive Load, Adequate in the Wide Range of Change of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 3. Pp. 3–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.003>
8. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkasskyi A.P. Nonlinear-parametrical Model of Electrical Resistance of Current-Carrying Granulated Mediums for a Wide Range of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 6. Pp. 3–17. (Rus)
9. Shydlovska N., Zakharchenko S., Cherkaskyi O. The influence of electric field parameters and temperature of hydrosols of metals' plasma-erosive particles on their resistance and permittivity. *Computational problems of electrical engineering*. 2014. Vol. 4, No 2. Pp. 77–84.
10. Shidlovskaia N.A., Zakharchenko S.N. Modeling of the processes in a circuit of the discharge of the capacitor on a spark-erosion loading. *Elektronnoe modelirovanie*. 2012. Vol. 34. No 6. Pp. 73–81. (Rus)
11. Zakharchenko S.N. The Influence of intensity of an external electric field and temperature on resistance of hydrosols metals produced by spark erosion. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2012. Issue 33. Pp. 113–120. (Rus)
12. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2006. No 2. Pp. 10–14.
13. Zakharchenko S.M. Statistical Research of Equivalent Electric Resistance of the Heterogeneous Current-carrying Medium at its Electroerosive Processing on an Example of Granules of Aluminum in Water. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2013. No 1 (133). Pp. 62–67. (Ukr)
14. Kornev J.I., Yavorovsky N.A., Saveliev G.G., Galanov A.I., Zaharchenko S.M., Perekos A.E., Danilenko N.B., Yurmazova T.A. Physico-chemical Processes in Electric Discharges in Liquid Media. *Proc. of 15th International Symposium on High-Current Electronics (15th SHCE)*. Tomsk, Russia, September 21–26, 2008. P. 480–483.
15. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Physical Prerequisites of Construction of Mathematical Models of Electric Resistance of Plasma-erosive Loads. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>
16. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Comparison of the Smoothing Efficiency of Signals of Voltage on the Plasma-erosive Load and its Current by Multi-Iterative Filtration Methods. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 3–13. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.003>
17. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Criteria for the Necessary and Sufficient Number of Iterations of Filtering Non-periodic Non-stationary Signals by Multi-iterative Methods. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 23–31. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.023>
18. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko M.I., Monastirskiy G.E., Peretyatko Yu.V., Petruchenko O.V. Stabilization of modes of electrotechnological systems of obtaining spark-eroded micro and nano powders. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichniy vypusk "Silova elektronika ta energoefektivnist"*. 2006. Vol. 1. Pp. 120–123. (Rus).
19. Zakharchenko S.N., Rudenko Yu.V., Cherkassky A.P. Improving the Accuracy of the Voltage Regulation in the Capacitive Energy Storage Devices for Pulse Plasma-erosion Treatment Systems of Heterogeneous Conductive Media. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 30–37. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.030>
20. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electroerosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)

21. Tesyk Yu.F., Komarov M.S., Klimenko D.M. Instantaneous current meter in power electronics devices. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2013. No 36. Pp. 133–138. (Ukr)
22. Xiyao Zhang. When to use an amplifier with rail-to-rail inputs and what to look for. *Radiolotsman*. 2016. No 9 (64). Pp. 22–24. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=179990> (Last access data 02.10.2019). (Rus)
23. Varskyi H.M. Measuring current transducer with electronic error compensation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2009. No 24. Pp. 119–125. (Rus)
24. Varskyi G.M. Influence of Interwinding Capacitance on Exactness of Work of High-Voltage Current Transformer. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 58–60. (Rus).
25. Varskyi H.M., Hrechko V.V., Tankevych E.N. Calculation of Electromagnetic System Parameters of Sensor for Electronic Current Transformer with Standardized Transient Performance. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2015. No 42. Pp. 129–135. (Rus)
26. Stognii B.S., Sopel M.F., Pankiv V.I., Tankevych Ye.M. Current Transformer Mathematical Model Based on Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 58–65. (Ukr).
27. Stognii B.S., Sopel M.F., Pankiv V.I., Tankevych E.M. Factors of determining the origin and amount of residual induction in the iron core of current transformers in operation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2016. No 43. Pp. 5–13. (Ukr)
28. Starodubtsev Yu.N. Theory and design of low power transformers. Moscow: Publishing Company RadioSoft, 2005. 320 p. (Rus)
29. Starodubtsev Yu.N., Belozero V.Ya. Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University, 2002. 384 p. (Rus)
30. Hertsyk O.M., Pereverzeva T.G., Kovbuz M.O., Boichyshyn L.M., Nosenko V.K., Borysiuk A.K. Electrical and Magnetic Properties of Multicomponent Amorphous Metal Compositions Based on Iron, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2017. Vol. 39, No. 8. Pp. 1023–1033 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.08.1023>.
31. Margelov A. Honeywell Current Sensors. *Elektronnyye komponenty*. 2007. № 7. Pp. 121–126. URL: [http://ecworld.ru/media/bip/pdfs/margelov\\_ec307.pdf](http://ecworld.ru/media/bip/pdfs/margelov_ec307.pdf) (Last access data 02.10.2019). (Rus)
32. Taranov S.G., Tesyk Yu.F., Braiko V.V., Karasinskii O.L., Shuvalov G.I., Pronzeleva S.Yu. Principles of construction of current converters based on Hall sensors. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2013. No 35. Pp. 96–107. (Rus)
33. Isolated current and voltage sensors manufactured by TVELEM Ltd. Specifications – Application – Calculations. (Rus) URL: [http://www.efo-power.ru/BROSHURES\\_CATALOGS/LEM/TVELEM\\_rus.pdf](http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/LEM/TVELEM_rus.pdf) (Last access data 02.10.2019).
34. Jobling D. New direct amplification current sensors, comparable in performance with compensation. *Silovaya Elektronika*. 2014. No 6. Pp. 66–69. (Rus) URL: <https://www.lem.com/ru/file/4469/download> (Last access data 03.10.2019).
35. Keysight N2780B Series AC/DC Current Probes A wide selection of current probes to meet your application's needs. Data Sheet. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-6432EN.pdf> (Last access data 03.10.2019).
36. SDS1000X, SDS1000X+ Series. Digital Oscilloscope. DataSheet-2016.05. URL: <http://www.amt.cz/info/1/SDS1000XPLUS.pdf> (Last access data 03.10.2019).
37. Data Sheet. Hall Effect Current Sensor. HS-SCH: NP. URL: <http://coretech.com.ua/docs/Sensors-hall/coretech-HCS-SH.pdf> (Last access data 03.10.2019).
38. Yakimov A.V. Physics of Noises and Parameter Fluctuations: Electronic Textbook. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2013. 85 p. (Rus) URL: [http://www.lib.unn.ru/students/src/Yakimov\\_Noise.pdf](http://www.lib.unn.ru/students/src/Yakimov_Noise.pdf) (Last access data 03.10.2019).
39. Gorshkov B.L. Practical design methods for normalizing sensor signals. Based on the materials of the seminar «Practical design techniques for sensor signal conditioning». Moscow: AVTEKS, 2014. 311 p. (Rus) URL: [http://www.autex.spb.su/download/seminar/ad/sensor99rus/s\\_11.pdf](http://www.autex.spb.su/download/seminar/ad/sensor99rus/s_11.pdf) (Last access data 03.10.2019).

Надійшла 09.10.2019

Received 09.10.2019