

УДК 621.317.727.3/.732

ШУНТ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

М.І.Фальковський, канд.техн.наук, **І.В.Божко**, канд.техн.наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги 56, Київ-57, 03680, Україна.

Описано принцип конструювання та конструкція шунта для вимірювання імпульсних струмів рівня 1000 А з фронтами імпульсів, більшими за 1 мкс. Особливістю шунта є трубчаста біфілярна конструкція, в якій внутрішня (резистивна) трубка замінена ніхромовими дротиками, розташованими по циліндричній поверхні. Малогабаритність досягнуто завдяки паяним з'єднанням ніхрому з міддю. Дано співставлення градувань шунта за допомогою низьковольтного вимірювача міліомних опорів, малострумове датчика змінних струмів, що додається до цифрового осцилографа, та з використанням робочої осцилограми розрядного струму у високовольтному розрядному колі. Розглянуто методику визначення за робочою осцилограмою і електрофізичними параметрами розрядного кола. Показано, що термостійкість шунта також забезпечена. Бібл. 9, рис. 6.
Ключові слова: шунт, імпульсний розрядний струм, осцилографування.

Потреба вимірювання великих імпульсних струмів досить поширена. Найбільш простим і надійним засобом для цього є осцилографування з електричними малоіндуктивними шунтами. Проте так склалося, що до цього часу імпульсні шунти не виготовляються серійно, і кожна лабораторія, де виникає потреба в таких вимірюваннях, вирішує цю проблему самостійно як нову. Через це інформація про різні конструкції, особливості градування та використання шунтів є актуальною.

З трьох основних видів шунтів [1–4,6,9] – петлевих біфілярних (з дротів або стрічок), трубчастих біфілярних і монофілярних пластинчатих – кращими слід вважати останні, в яких можна досягти чи не найменшої величини електромагнітної сталої часу шунта $\tau=10^{-11}$ с [1]. Однак використання в них особливих матеріалів високого електричного питомого опору робить їх недостатньо доступними для практичного виготовлення. Подібною є проблема виготовлення трубчастих коаксіальних шунтів, які хоч і можуть також забезпечити низьке значення $\tau\sim 10^{-9}$ с [9], але потребують використання тонкостінної внутрішньої (резистивної) трубки з матеріалу високого питомого опору (манганін, константан тощо) як еталонного елемента шунта. Такі вироби також не є легкодоступними. Проте, можна сумістити переваги трубчастих коаксіальних шунтів з доступністю матеріалу високого опору та простотою виготовлення, якщо внутрішню еталонну трубку замінити дротиками (відрідками дроту) з ніхрому [7]. Розробка та дослідження такого шунта на струми рівня 1000 А тривалістю 1 мс і з фронтом в межах 1 мкс розглядаються у цій роботі.

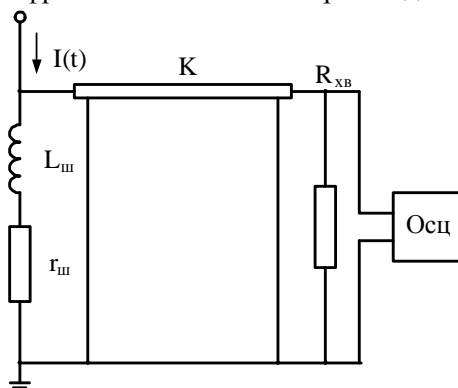


Рис. 1

Принципи розробки та конструкція. Схема вимірювання імпульсного струму $I(t)$ показана на рис. 1. На шунті падає напруга, пропорційна імпульсному струму $I(t)$, що протікає через нього. Падіння напруги на шунті $U_{ш}(t)$ подається на вхід осцилографа через коаксіальний кабель K , який закорочено на хвильовий опір $R_{хв}$. Оболонка кабелю заземляється з обох кінців. Схемна простота вимірювання ускладнюється наявністю у будь-якого шунта незкомпенсованої (паразитної) індуктивності $L_{ш}$. Через це імпульс напруги на шунті спотворюється падінням напруги на індуктивності $U_L(t)$, і реальна напруга шунта складає

$$U_{ш}(t) = U_r(t) + U_L(t) = I(t)r_{ш} + L_{ш}dI(t)/dt. \quad (1)$$

Зрозуміло, що чим крутіший фронт імпульсу і коротший сам імпульс, тим більше значення $L_{ш}$ і, відповідно, більше спотворення імпульсу струму. Метод

зменшення індуктивності шунтів загальновідомий: робити їх біфілярними. Проте біфілярні шунти з дротів і стрічок, складених удвоє для біфілярності, недостатньо компенсують індуктивність і, крім того, піддаються індуктивним наводкам від великопотужних гілок установки, в якій ведеться вимірювання. Від таких наводок убезпечені коаксіальні трубчасті шунти, оскільки внутрішня еталонна (резистивна) трубка захищена від наводок екрануючою зовнішньою трубкою, що є однією з принципових переваг біфілярних трубчастих шунтів.

Найважливішим параметром шунта, що характеризує частотний діапазон, в якому він може бути використаний, є його електромагнітна постійна часу $\tau_u = L_{uu} / r_{uu}$. Для передачі імпульсу без спотворень потрібно, щоб постійна часу τ_u була на порядок меншою тривалості його фронту τ_ϕ або хоча б співрозмірною з нею. Постійна часу, наприклад, петлевого шунта τ_n із дроту, має такий зв'язок з його параметрами [1]:

$$\tau_n = \frac{\mu_0 a^2}{\rho} \left(\ln \frac{k}{a} + \frac{1}{4} \right), \quad (2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнітна стала, a – радіус дроту, k – відстань між центрами дротів, ρ – питомий опір матеріалу дроту. Якісно подібна залежність має місце і для трубчастого коаксіального біфіляра.

З (2) видно, що для зменшення індуктивності L_{uu} і, відповідно, постійної часу τ_n потрібні якомога менші діаметри дротів і відстань між ними, тобто менші значення величин, які обумовлюють "якість" біфілярності. Третій фактор – питомий опір ρ , навпаки, має бути якомога більшим.

Крім вказаних факторів, постійна часу змінюється і від скін-ефекту при високих частотах. Витіснення струму на поверхню провідника збільшує його опір і зменшує внутрішню індуктивність. Мірою витіснення височастотного струму є глибина проникнення електромагнітного поля в матеріал Δ , яка також залежить від його питомого опору ρ і частоти f [3]: $\Delta = (\rho / \pi f \mu \mu_0)^{1/2}$. Для ніхрому, наприклад, величина проникнення поля при частоті $f = 10^6$ Гц складає $\Delta = 0,525$ мм (відносна магнітна стала $\mu = 1$). Для дроту величина Δ являється і його радіусом a , тобто при вказаній частоті в ніхромовому дроті діаметром $d = 2a = 2\Delta = 1,05$ мм розподіл струму по перерізу є ще практично неспотвореним скін-ефектом. Це один з вагомих аргументів щодо використання ніхромових дротів як резистивної частини шунтів.

Враховуючи викладене, для вимірювання імпульсних струмів з параметрами, близькими до вказаних вище, запропоновано біфілярний коаксіальний шунт, схематичне зображення якого показано на рис. 2. Струм, що вимірюється, підводиться мідним проводом 1, впаяним у верхню пластину резистивної частини шунта 2, а відводиться через верхній фланець мідної трубки-корпусу 3. Вимірювальна (резистивна) частина розрахована на 5 мОм і складається з $n = 12$ ніхромових дротиків 4 діаметром $d = 1$ мм, довжиною $l = 50$ мм, впаяних у верхню 2 і нижню 6 мідні пластини резистивної частини. Дротики 4 розміщені у фторопластових трубках 5 товщиною стінки 0,2 мм і притискаються до внутрішньої поверхні трубки-корпусу 3. Потенціальні вимірювальні виводи 7, 8 припаяні відповідно до верхньої 2 і нижньої 6 пластин резистивної частини. Вигляд резистивної частини і зовнішньої оболонки шунта 3 показано на рис. 3.

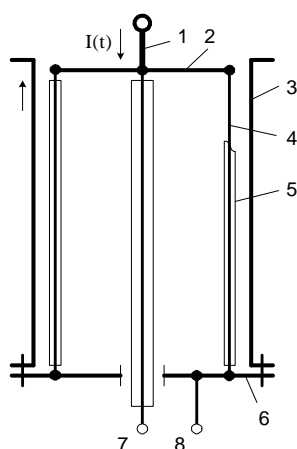


Рис. 2

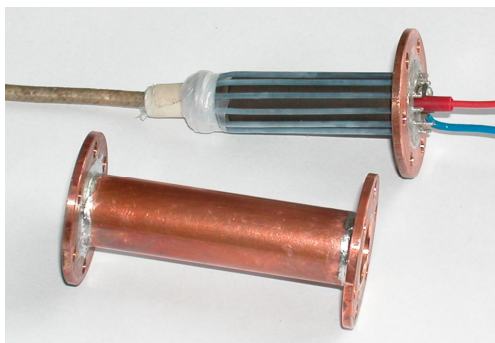


Рис. 3

Розрахункова величина опору шунта $r_{ш}$ складає $r_{ш}=\rho l/ns=0,00578$ Ом при питомому опорі ніхрому $\rho=1,09\cdot 10^{-6}$ Ом·м і s – площі перерізу дротика.

Величина постійної часу дротика τ_1 за умови $r \leq \Delta$ складає [3]

$$\tau_1 = \frac{\mu_0 a^2}{8\rho} = 3,57 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

Ця ж величина постійної часу залишається для всієї групи дротиків, розташованих по циліндричній поверхні, за умови слабкої електромагнітної взаємодії між струмами в них [2], тобто за такої умови це є мінімальна постійна часу шунта $\tau_{ш}=\tau_1$. При сильній взаємодії між струмами дротиків постійна часу шунта збільшується [2] аж до величини $\tau_{ш}=n \tau_1=4,28\cdot 10^{-7}$ с. Таким чином, можна очікувати, що постійна часу всього шунта, що розглядається, має складати величину в межах $5\cdot 10^{-8} - 5\cdot 10^{-7}$ с.

Градування шунта. Визначення фактичної величини опору шунта $r_{ш}$ є також відповідальним етапом роботи. Найпростіший метод – визначення $r_{ш}$ за допомогою мостових методів або сучасними високоточними електронними вимірювачами *RLC*. У даній роботі використано «Прецизійний *LCR*-вимірювач BR2876-5» фірми SHANGHAI MCP CORP. Проте використання низьковольтного приладу навіть такого високого класу не дає надійних результатів через вплив контактних опорів при низькій вимірювальній напрузі, вплив опорів сполучних проводів, зокрема потенціальних проводів шунта тощо. При різних схемних переключеннях і різних частотах одержувані результати відрізняються в рази. Найближчий до розрахункового значення $r_{ш}$ результат одержано в діапазоні частот $f=20-1000$ Гц, який склав $r_{ш}=6,9-6,7$ мОм.

Є можливість провести градування шунта при порівняно малих імпульсних струмах за допомогою датчика змінних струмів Р6021 фірми Tektronix. За паспортом дозволяється використання датчика при амплітуді імпульсного струму до 250 А, а за умови добутку амплітуди струму через датчик I_0 (в А) на час його дії t_0 (в мкс) – не більше як $I_0 \cdot t_0 \leq 500$ А·мкс. Тобто при допустимій максимальній амплітуді 250 А її дія має продовжуватись не більше, ніж 2 мкс. Одночасні осцилограми одного й того самого імпульсу струму, одержані за допомогою шунта (крива 1 на рис. 4 – напруга на шунті у В) й датчика Р6021 (крива 2 – струм наводиться безпосередньо в А), дають можливість порівняти обидві криві тільки від початку ($t=0$) до моменту часу $t=t_m$. Як видно на кривій 2, при $t=t_m$ проходить

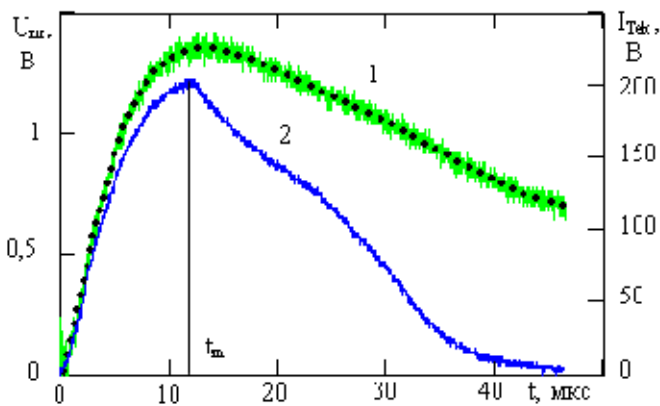


Рис. 4

злам осцилограми від датчика Р6021, який свідчить про те, що після моменту часу t_m датчик не працює, оскільки вже виконана вказана вище вимога допустимого використання датчика Р6021: $I_0 \cdot t_0 \leq 500$ А·мкс. Відношення напруги шунта $U_{ш}$, крива 1 (пунктир – осереднення кривої), в межах часу $0-t_m$ до струму $I_{Тек}$, зафіксованому за допомогою датчика Р6021 (крива 2), і є величиною опору шунта $U_{ш}/I_{Тек}=r_{ш}$, якщо вважати показання датчика Р6021 еталонними. Одержане таким чином значення $r_{ш}$ в межах часу від другої до дванадцятої мкс показано на рис. 5 і змінюється від 6,86 до 6,68 мОм, тобто практично співпадає з наведеними вище резуль-

татами вимірювань низьковольтним приладом BR2876-5. З рис. 5 також видно, що згідно з кривими імпульсу струму на рис. 4 значення $r_{ш}$ не є сталим, а зменшується протягом розвитку імпульсу струму. Такий самий ефект в тій чи іншій мірі спостерігається і при інших розрядних імпульсах. Таким чином, датчик струму Р6021 дає можливість провести градування шунта тільки на початку робочого діапазону зі струмами до $I_0 \sim 200$ А.

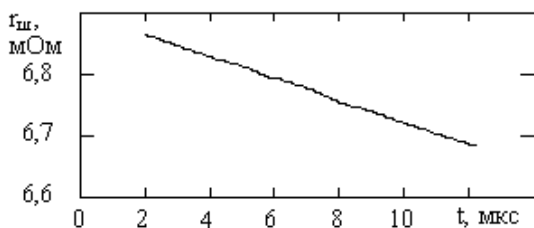


Рис. 5

Найбільш надійним варто вважати градування за робочими осцилограмами, записаними за допомогою самого шунта безпосередньо у високовольтному розрядному колі при максимальних струмах, коли можна очікувати меншого впливу контактних явищ на результат та виконати градування у всьому робочому діапазоні шунта. Розряд конденсаторної батареї дає

апериодичний або сильно затухаючий періодичний імпульс струму

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-bt} \sin \omega t. \quad (4)$$

Для прикладу на рис. 6 показано осцилограму напруги з шунта $U_{ш}(t)$, включеного в електричне коло розряду конденсаторної батареї ємністю $C_0=304,19$ нФ і з початковою напругою на ній $U_0=3,19$ кВ.

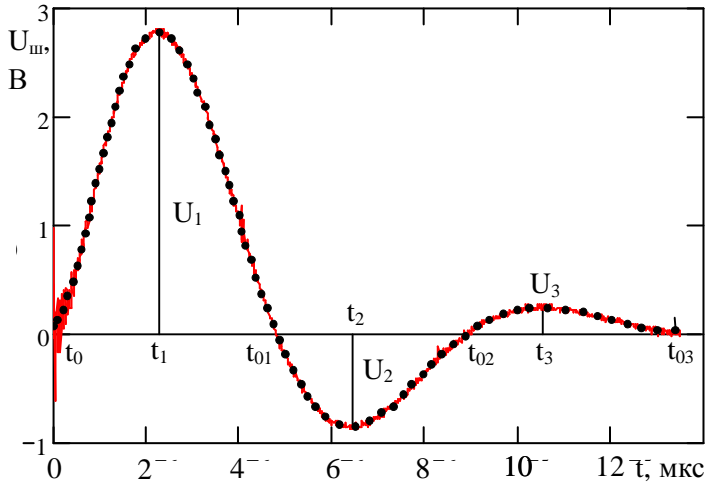


Рис. 6

Розряд комутувався повітряним розрядником. У розрядне коло були включені також зосереджені індуктивність $L=4,53 \cdot 10^{-6}$ Г і активний опір $R=2,12$ Ом

Осцилограма напруги шунта $U_{ш}(t)$, рис. 6, відрізняється від струму в розрядному колі $I(t)$ множителем $r_{ш}$: $U_{ш}(t)=r_{ш}I(t)$. Індуктивною складовою $L_{ш}dI(t)/dt$ у рівнянні (1) можна нехтувати, оскільки мається на увазі, що шунт працює в своєму частотному діапазоні, тобто при імпульсах струму, у яких $\tau_{\phi} > \tau_{ш}$. Просте співвідношення між зарядом батареї конденсаторів C_0U_0 ,

розрядним струмом $I(t)$ і заосцилографованою напругою на шунті $U_{ш}(t)$

$$C_0U_0 = \int_0^{\infty} I(t) dt = \frac{1}{r_{ш}} \int_0^{\infty} U_{ш}(t) dt$$

дає можливість легко визначити опір шунта $r_{ш} = \frac{1}{C_0U_0} \int_0^{\infty} U_{ш}(t) dt$.

Ємність батареї конденсаторів C_0 і початкову напругу на ній U_0 виміряти просто. Сучасні осцилографи дають осцилограми і у цифровому вигляді, через це криву $U_{ш}(t)$ за допомогою регресії і сплайн-інтерполяції [5] легко згладити і осереднити (пунктир на рис. 6) та відповідно одержати інтеграл $\int_0^{\infty} U_{ш}(t) dt$, не застосовуючи ручних графічних процедур. Одержані таким чином значення $r_{ш}$

знаходяться в діапазоні 6,264–6,394 мОм з середнім значенням $r_{ш}=6,315$ мОм і розкидом даних $\pm 0,8\%$. Розходження з наведеними вище даними вимірювання низьковольтним приладом BR2876-5 і датчиком струму P6021 в середньому досягає 7%. Хоча результати досить близькі, але перевагу слід віддати даним, одержаним в робочому режимі. Крім того, ці дані бажано отримувати при високих розрядних напругах та струмах, близьких до максимальних робочих.

Визначення електрофізичних параметрів розрядного кола. Робоча осцилограма, рис. 6, навіть з неградуированого шунта дозволяє одержати всі параметри розрядного кола, які є і параметрами теоретичного виразу розрядного струму (4): кругову частоту ω , індуктивність L , коефіцієнт затухання b , активний опір кола R тощо. Зокрема в потужних генераторах імпульсних струмів часто ці параметри розрядного кола знати навіть більш важливо, ніж дані шунта. При цих розрахунках важливо враховувати сильно затухаючий характер розряду [8].

Період коливання T доводиться обчислювати як середнє з кількох вимірів часу, рис. 6: t_0-t_{02} , t_1-t_3 , $2(t_1-t_2)$, $2(t_2-t_3)$, оскільки в затухаючих коливаннях період T не є строго стабільною величиною. Середня величина T склала $8,68 \cdot 10^{-6}$ с, відповідно $\omega=2\pi/T=7,23 \cdot 10^5$ с⁻¹. Коефіцієнт затухання b визначається через логарифмічний декремент затухання δ : $b=\delta/T$. Оскільки $\delta=\ln \frac{I(t)}{I(t+T)}$, або в даному випадку $\delta=\ln \frac{U_{ш}(t)}{U_{ш}(t+T)}$, то при сильно затухаючому розряді доводиться користуватися також декре-

ментом затухання за проміжок часу Δt , меншим, ніж T [8]: $\delta' = \ln \frac{U_u(t)}{U_u(t + \Delta t)}$ і b визначати не тільки як

$b = \frac{\delta}{T}$, а й $b = \frac{\delta'}{\Delta t'}$. Наприклад, з рис. 6: $\delta' = \ln \frac{U_1}{U_2}$ і, відповідно, $b = \frac{\delta'}{t_2 - t_1}$, $\delta'' = \ln \frac{U_2}{U_3}$ і, відповідно,

$b = \frac{\delta''}{t_3 - t_2}$ тощо. Середнє значення b склало $b = 2,86 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Згідно з одержаними значеннями ω і b

індуктивність L розрядного контуру має величину

$$L = \frac{1}{C_0(\omega^2 + b^2)} = 5,43 \cdot 10^{-6} \text{ Г},$$

а активний опір R контура $R = 2bL = 3,11 \text{ Ом}$. Одержані значення L і R більші від тих, які були введені в розрядне коло (відповідно $4,53 \cdot 10^{-6} \text{ Г}$ і $2,12 \text{ Ом}$). Ця відмінність пов'язана з іншими елементами кола: провідниками з'єднання, їхнім розташуванням, контактними опорами, дугою розрядника тощо. Визначені параметри ω , L , b дозволяють обчислити криву струму (4) як зворотну контрольну перевірку градування шунта, якщо синусоїдальність кривої не порушена комутаційним розрядником.

Таким чином, робоча осцилограма затухаючого імпульсного коливального розряду дозволяє порівняно просто досягти двох цілей: проградувати вимірювальний електричний шунт та визначити електрофізичні параметри розрядного контуру. Слід зазначити, що за такою ж методикою можна проградувати і інші засоби вимірювання імпульсних струмів – пояс Роговського, датчик струму Р6021, датчики Холла тощо.

Термостійкість. Для шунтів обов'язкова перевірка термічної стійкості. Вважається небажаним підвищення температури Θ резистивного елемента за розряд до величини, більшої ніж $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [6]. При номінальній амплітуді струму через шунт $I_u = 1000 \text{ А}$ та протягом часу $\tau_i \sim 1 \text{ мс}$ (прямокутний імпульс) і при $r_u = 6,315 \text{ мОм}$ нагрів $\Delta\Theta$ резистивної частини за умови адіабатичного процесу нагрівання складе

$$\Delta\Theta = \frac{I_u^2 r_u \tau_i}{c m_u} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

при питомій теплоємності ніхрому $c = 0,38 \text{ Дж/гр}^\circ\text{C}$ і масі резистивної частини шунта $m_u = 4 \text{ гр}$ $^\circ\text{C}$. Тобто навіть при досить жорсткому навантаженні ($\tau_i \sim 1 \text{ мс}$ при $I_u = \text{max}$) описаний шунт цілком термостійкий.

Запропонований шунт для вимірювання імпульсних струмів відповідає прийнятим електричним параметрам і відзначається простотою конструкції, доступністю резистивного матеріалу (ніхромовий дріт), малими габаритами, широким частотним діапазоном роботи. Принаймні допустимою є робота з мінімальним фронтом імпульсів від 1 мкс , оскільки розрахункова постійна часу шунта має приблизно на порядок менше значення $\sim 10^{-7} \text{ с}$. Простота конструкції досягається завдяки паяним з'єднанням ніхрому з мідними деталями.

Слід відзначити також простоту описаної методики градування шунта та методики визначення електрофізичних параметрів розрядного контуру за робочою осцилограмою.

1. Андреев С.И., Лукоконен Р.А. Прецизионный шунт для регистрации мегаамперных токов // Приборы и техника экспериментов. – №3. – 1970. – С. 201–202.

2. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Ленинград: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 120 с.

3. Говард П.Р. Измерение импульсных напряжений и токов. В сборнике статей "Точные электрические измерения". – Москва: Издательство иностранной литературы, 1959. – С. 251–269.

4. 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 «ХПІ», Тем. випуск "Техніка і електрофізика високих напруг". – 2007. – №20. – С. 75–79.

5. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. – Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2006. – 608 с.

6. Кузюкин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – Москва: Энергия, 1980. – 136 с.

7. Фальковский Н.И. Коаксиальный шунт для измерения больших импульсных токов // Приборы и техника экспериментов. – №3. – 1973. – С. 147–149.

8. Фальковський М.І. Визначення індуктивності генераторів імпульсних струмів за осцилограмами з врахуванням декременту затухання // Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Електроенергетика. – Київ: Видавництво київського університету. – 1966. – №3. – С. 70–76.

9. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. Перевод с нем. – М.: Энергия, 1973. – 232 с.

УДК 621.317.727.3/732

ШУНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Н.И.Фальковский, канд.техн.наук, И.В.Божко, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Описаны принцип конструирования и конструкция шунта для измерения импульсных токов уровня 1000 А с фронтами импульсов большими, чем 1 мкс. Особенностью шунта является трубчатая бифилярная конструкция, в которой внутренняя (резистивная) трубка заменена нихромовыми проволоками, расположенными по цилиндрической поверхности. Малогабаритность достигнута благодаря паяным соединениям нихрома с медью. Дано сопоставление градуировок шунта с помощью низковольтного измерителя миллиомных сопротивлений, слаботочного датчика переменных токов, прилаемого к цифровому осцилографу, и с использованием рабочей осциллограммы разрядного тока в высоковольтной разрядной цепи. Рассмотрена методика определения по рабочей осциллограмме и электрофизическим параметрам разрядной цепи. Показано, что термостойкость шунта также обеспечена. Библ. 9, рис. 6.

Ключевые слова: шунт, импульсный разрядный ток, осциллографирование.

A SHUNT TO MEASURE PULSE CURRENTS

M.I. Falkovsky, I.V. Bozhko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

The principles of design and construction of the shunt to measure pulse currents to 1 kA with fronts pulses over 1 μsec are described. The peculiarity of the shunt is a tubular bifilar design in which internal resistive tube replaced nichrome wires, located on the cylindrical surface. Small size shunt reached as a result of construction and technology of manufacturing it. Given the comparison of the characteristics of the shunt that obtained by using low-voltage ohmmeter, inductive sensor AC and oscillograms of voltage of the shunt. Considered the methodology, which is based on those oscillograms, which can also define parameter electrical circuit. It is shown that thermal resistance of the shunt is also provided. References 9, figures 6.

Key words: shunt, the pulsed discharge current, oscillography.

1. Andreev S.I., Luikonen R.A. Precision shunt to register magampere currents // Pribory i tekhnika eksperimentov. – 1970. – №3. – Pp. 201–202. (Rus)

2. Veksler M.S., Teplinskii A.M. AC shunts. – Leningrad: Energoatomizdat, 1987. – 120 p. (Rus)

3. Govard P.R. Measurement of pulse voltages and currents. In the collection of articles: "Accurate electrical measurements". – Moskva: Izdatelstvo inostranoi literatury, 1959. – Pp. 251–269. (Rus)

4. Dnishchenko V.N., Eremeev B.O., Nedzelskii O.S., Ponuzhdaeva E.G. Measuring shunt ShK-300 for definition of amplitude pulse lightning phenomena // Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Tematychnyi vypusk "Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh". – 2007. – №. 20. – Pp. 75–79. (Rus)

5. Kirianov D.V. Mathcad 13. – S.-Peterburg: BHV-Peterburg, 2006. – 608 p. (Rus)

6. Kuzhekin I.P. Test devices and measurements at a high voltage. – Moskva: Energiia, 1980. – 136 p. (Rus)

7. Falkovskii N.I. Coaxial shunt for measuring high pulse current // Pribory i tekhnika eksperimentov. – 1973. – №3 – Pp. 147–149. (Rus)

8. Falkovsky M.I. Definition of inductance generators of pulse currents with oscilogramami taking dekrementa fade // Visnyk kyivskoho politekhnichnoho Instytutu. Seriiia Elektroenerhetyka. – 1966. – №3. – Pp. 70–76. (Ukr)

9. Shvab A. Measurements at a high voltage. Translation from German. – Moskva: Energiia, 1973. – 232 p. (Rus)

Надійшла 22.02.2012

Received 22.02.2012