

УДК 681.51+621.314.5

Д. В. ВІННИЧЕНКО¹, Н. С. НАЗАРОВА¹ (канд. техн. наук, доц.),І. Л. ВІННИЧЕНКО², Ю. О. АДАМЧУК²¹ Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макароваvdvvs@inbox.ru

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГЕНЕРАТОРАХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

Показано можливість використання поясу Rogovsky як датчика струму для комплексу струмового захисту в високовольтних генераторах імпульсних струмів. Розроблено архітектуру та макетний зразок чотириканального електротехнічного комплексу струмового захисту, який випробувано на експериментальному чотириканальному генераторі імпульсних струмів для розрядної імпульсної установки.

Ключові слова: пояс Rogovsky, генератор імпульсних струмів, архітектура, макетний зразок, інтегратор, амплітуда розрядного струму, електротехнічний комплекс.

В наш час все більшого розповсюдження набувають прогресивні технології, засновані на імпульсному впливі на об'єкт обробки, у тому числі розрядноімпульсні технології на базі високовольтного електричного розряду (електровибуху) у конденсованих середовищах. Поряд з високою продуктивністю та легкістю реалізації ці технології характеризуються екологічною чистотою, меншими енергозатратами порівняно з традиційними методами обробки та у своїй більшості являють собою безвідходне виробництво. Їх основою є процес перетворення енергії електричного поля у механічну роботу за допомогою імпульсного вводу енергії в розрядний канал, що формується у суцільному конденсованому середовищі (воді). Розрядний канал використовується як джерело імпульсного тиску на об'єкт обробки. Енергія електричного поля за час 10^{-5} - 10^{-4} виділяється у локальному об'ємі розрядного каналу з густиною 10^{14} - 10^{15} Дж/м³, яку можна порівняти з вибухом традиційних вибухових речовин. Високі температури та тиски приводять до швидкого розширення каналу, в результаті чого в оточуючому середовищі виникають інтенсивні хвилі стиснення та гідропотоки рідини [1]. Ефективність розрядноімпульсних технологій у значній мірі залежить від режиму розряду накопичувача енергії та амплітуди розрядного струму. У роботі [1] показано залежність амплітуди тиску від потужності та струму у каналі розряду. Характер зміни струму в процесі розряду несе інформацію про перебіг електровибухового технологічного процесу, наприклад, дозволяє виявляти аварійні ситуації (коротке замикання, холості розряди). Тому характеристики розрядного струму (форму, амплітуду, тривалість, декремент затухання) можна використовувати як інформаційні величини (інформаційні координати вихідного вектора об'єкта спостереження), що потребує підвищити вимоги до системи вимірювання розрядного струму для забезпечення заданого ступеня точності. Досвід використання амплітуди розрядного струму як інформаційної координати [2-4] в системах керування розрядноімпульсних установок підтверджує надійність цього методу контролю технологічного процесу. Сучасні дослідження [5] обґрунтовують можливість підвищення енергоефективності розрядноімпульсних технологій при застосуванні оптимальної системи керування, побудованої за критерієм мінімізації функції втрат. При цьому інформаційна координата містить амплітуду розрядного струму. Реалізувати таку систему можна, якщо розробити систему контролю інформації про кількість імпульсів з номінальним розрядним струмом і кількість імпульсів зі струмом, нижчим за критичний (струмом холостих розрядів). З іншого боку, розвиток апаратних і програмних засобів дозволяє створювати складні інформаційно-керуючі системи для керування технологічними процесами. Але впровадження таких систем для розрядноімпульсних технологій стримується такими факторами, як великі імпульсні струми в електричних колах установок та наведені електромагнітні поля з великою густиною енергії.

Метою проведених досліджень є обґрунтування структури системи контролю розрядного струму і розробка комплексу для струмового захисту генераторів імпульсних струмів і контролю технологічного процесу.

На рис.1,а наведено спрощену схему генератору імпульсних струмів (ГІС), який використовується в розрядноімпульсних технологіях. До складу ГІС входять: ємнісний накопичувач енергії C_p , газорозрядний комутатор K (вакуумний або повітряний розрядник, в останній час також використовують напівпровідникові комутатори – тиристори та транзистори), сумарна індуктивність контуру L (до неї входять індуктивність підходящих проводів, з'єднань, комутатору), технологічне навантаження R_n , яке може бути як активним (канал розряду), так і реактивним (імпульсний трансформатор). Для різних розрядноімпульсних технологій [2] накопичувач енергії C_p має діапазон робочих напруг від 0,3 до 50 кВ та ємностей від 0,01 до 1000 мкФ. Максимальний струм у навантаженні, наприклад для розрядноімпульсної технології [2], при параметрах генератору: напруга на конденсаторі – 40 кВ, ємність накопичувача – 16 мкФ, індуктивність розрядного контуру – 4 мкГн, розрахований за методикою [6], дорівнює:

$$I_m = \sqrt{\frac{2W}{L}} = \frac{U_c}{\sqrt{\frac{L}{C_p}}} = \frac{4 \cdot 10^4}{\sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot 10^{-6}}}} = 8 \cdot 10^4 \text{ A}, \quad (1)$$

де U_c – напруга на конденсаторі; W – енергія накопичувача.

Характерний час наростання струму (при коливальному режимі розряду):

$$t_{rise} \approx \pi \frac{\sqrt{LC_p}}{2} \approx 100 \text{ мкс}, \quad (2)$$

де t_{rise} – час зростання струму від 0 до максимального значення.

Як видно з (1) та (2), максимальний (короткого замикання) струм такого генератора сягає 80 кА, тому при виборі датчика струму треба приділяти увагу тому, що вимірюватися будуть значення струму, які мають порядок від 10^2 до 10^5 ампер, та час зростання від 1 мкс до 1мс.

Взагалі існує декілька методів вимірювання струму, а саме: за допомогою резистивного шунта, трансформатора струму, датчика на основі ефекту Холла, магніторезистивного датчика, магнітооптичного датчика, пояса Роговського.

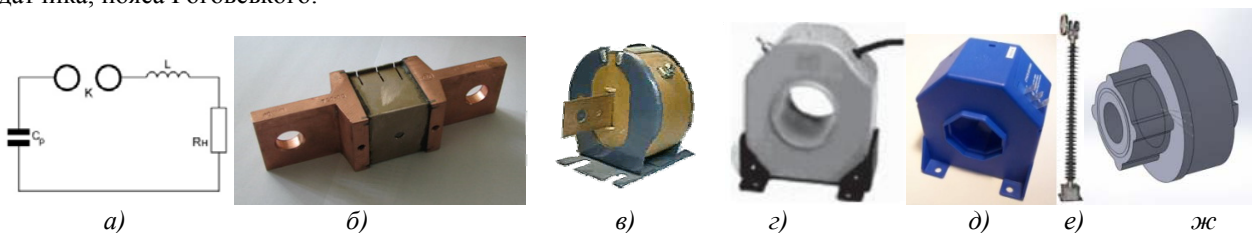


Рисунок 1 – Спрощена схема генератора імпульсних струмів (а) і зовнішній вигляд датчиків струму (б-ж)

Розглянемо переваги і недоліки кожного датчика.

Резистивний шунт (рис.1, б). Переваг у цього датчика дві: низька вартість та лінійність, але є і недоліки: відсутність гальванічної від'язки, обмежений діапазон перетворювальних струмів, паразитна індуктивність, зміщення по постійному струму.

Трансформатор струму (рис.1, в). 3 переваг: можливість перетворення великих струмів, невелика власна споживана потужність. 3 недоліків: насичення, гістерезис, фазовий зсув, неможливість перетворення постійного струму, відносно великі масогабаритні показники.

Датчики на основі ефекту Холла (рис.1, г) мають таку перевагу, як широкий динамічний діапазон, але недоліків декілька: гістерезис, насичення, температурний дрейф, висока вартість.

Магніторезистивні датчики (рис.1, д) мають такі переваги, як висока надійність, висока чутливість, широкий діапазон робочих частот (від 0 Гц до 10 МГц) та широкий діапазон робочих температур, але є і недоліки: нелінійність та чутливість до зовнішніх магнітних полів.

Магнітооптичні датчики (рис.1, е) мають наступні переваги: висока точність вимірювання, та широкий діапазон вимірюваних струмів (від 1 мА до 10 МА), а з боку недоліків - велика ціна. Також вираш у точності, розмірі та масі проявляє себе лише за умовою вимірювання надвеликих струмів.

Пояс (котушка) Роговського (рис.1, ж) відзначається наступними перевагами: невелика вартість, немає обмежень по насиченості, невелика споживана потужність, дуже низька температурна залежність, несприйнятливості до зміщення по постійному струму, але ж є і деякі недоліки, а саме: вихідний сигнал потребує використання апаратного інтегратора та наявності чутливості до зовнішніх магнітних полів.

З урахуванням вищесказаного для струмів порядку десятків - сотень кілоампер, з напругами на ділянках розрядного кола до 50 кВ і наявністю наведених в багатоканальній розрядноімпульсній системі електромагнітних полів з великою густиною енергії найбільш доцільним є використання датчиків струму на основі поясу Роговського.

Пояс Роговського являє собою довгий соленоїд з повітряним сердечником з рівномірними витками. Кінці котушки виводяться разом і замикаються через опір навантаження. У більшості випадків пояс Роговського намотується на гнучкий стрижень, який потім і охоплює струмоведучий провідник. Відсутність магнітного осердя забезпечує переваги, властиві цьому типу датчиків: високу лінійність, точність і надійність.

На відміну від трансформатора струму в котушці Роговського немає первинної обмотки. У котушці, яка охоплює провідник з вимірюваним струмом, при замиканні контуру наводиться е.р.с., величина якої не залежить від форми петлі і її розташування відносно проводу. Зв'язок між електричним струмом і напруженістю магнітного поля встановлюється законом повного струму (першим рівнянням Максвелла або рівнянням Ампера), який свідчить, що лінійний інтеграл напруженості магнітного поля по будь-якому замкнутому контуру дорівнює повному струму через поверхню, обмежену цим контуром:

$$i = \oint H \cos \alpha dl, \quad (3)$$

де H – напруженість магнітного поля; α – кут між вектором магнітного поля H і напрямком нормалі до площини витка елементарної секції довжиною dl .

Вважаючи провідник зі струмом нескінченно довгим, а розташування котушки таким, що напруженість магнітного поля розподілено рівномірно по площині витка котушки (рис. 2, а), розрахуємо вихідну напругу поясу Роговського, який складається з N витків.

$$e(t) = -\frac{d\Psi}{dt}; \Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N, \quad (4)$$

де Ψ – потокозчеплення; Φ_1, Φ_2, Φ_N – магнітний потік крізь перший, другий, та N -й виток.

Вважаючи, що витки однакові ($l=l_1=l_2=\dots=l_N$ та $a=a_1=a_2=\dots=a_N$) та розташовані на однаковій відстані h від провідника зі струмом (рис.2, а), можна стверджувати, що:

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5)$$

де Φ – магнітний потік крізь виток поясу, N – кількість витків поясу.

Якщо потік крізь виток рівномірний:

$$\Phi(t) = B(t) \cdot S = B(t) \cdot a \cdot l, \quad (6)$$

де B – індукція поля, S – площа перетину витка, a – ширина витка, l – довжина витка.

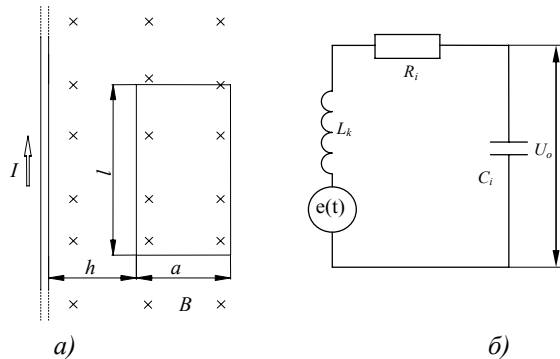


Рисунок 2 – Схема для розрахунку (а) та схема заміщення поясу Роговського з інтегратором (б).

Виходячи з (3) та вважаючи провідник зі струмом нескінченно довгим, а потік рівномірним по площині:

$$B(t) = \mu_0 H(t); H(t) = \frac{I(t)}{2\pi h}, \text{ отже } B(t) = \mu_0 \frac{I(t)}{2\pi h}; \Phi(t) = \mu_0 a l \frac{I(t)}{2\pi h}; e(t) = -N \frac{\mu_0 a l}{2\pi h} \cdot \frac{dI}{dt}, \quad (7)$$

де H – напруженість поля у витку, $I(t)$ – струм крізь провідник, μ_0 – магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Величина $M = N \frac{\mu_0 a l}{2\pi h}$ є взаємною індуктивністю між провідником зі струмом та поясом Роговського,

тобто визначається винятково параметрами котушки.

$$e(t) = -M \frac{dI}{dt}. \quad (8)$$

Як видно з (8), напруга на виході поясу Роговського пропорційна похідній струму, тому, для вимірювання розрядного струму використовують інтегратор (активний або пасивний) щоб перетворити сигнал пропорційний похідній струму в сигнал пропорційний струму $I(t)$. Для інтегрування на низьких частотах (десятки – сотні герц) та невеликих струмів ($10^2 - 10^3$ А) використовуються активні інтегратори на основі операційних підсилювачів розрахунок яких описано в [7]. Але, виходячі, з (1) та (2) в системі використаємо пасивний інтегратор, який наведено на рис. 2,б.

Моделювання роботи ГІС на різноімпедансне навантаження показує збіг значень розрядного струму і сигналу на виході інтегратора з точністю до 2 %.

Під час розробки структури системи контролю розрядного струму ураховано такі особливості розрядноімпульсних технологій, як великі імпульсні струми в електричних колах установок та наведені електромагнітні поля з великою густиною енергії. Розроблено схемні рішення, що дозволяють гарантувати надійну роботу системи контролю розрядного струму і реагування на аварійні ситуації. На рис.3 наведено блок-схему струмового захисту чотириканального ГІС від короткого замикання в будь-якому каналі. В інформаційній системі виводиться на дисплей і накопичується інформація про кількість розрядів з номінальним струмом і струмом з величиною меншою ніж допускається для технології. Це дозволяє відкоригувати режим обробки для досягнення бажаного технологічного ефекту.

Розроблено електротехнічний комплекс струмового захисту чотириканального ГІС, що містить систему збору, накопичення та обробки інформації про розрядні струми, що протікають одночасно або з часовим розбігом у

кожному розрядному каналі, і автоматичну систему захисту генератора від режиму короткого замикання у навантаженні (рис.4). Пристрій пройшов випробування на експериментальній розрядноімпульсній установці.

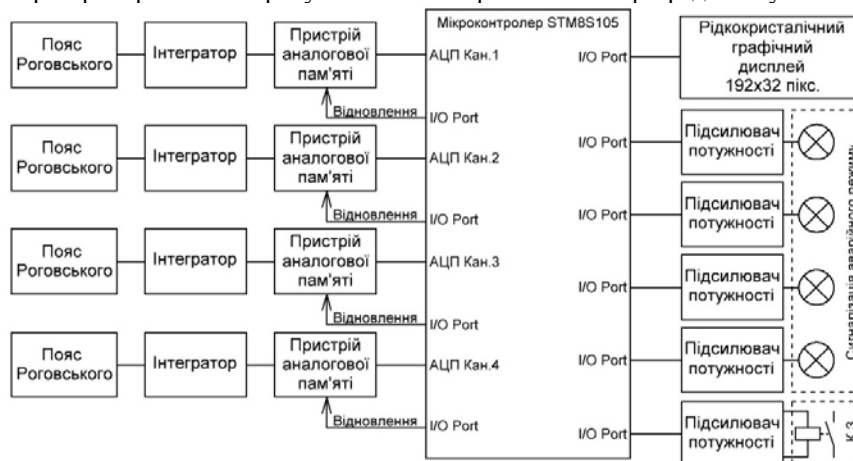


Рисунок 3 – Блок-схема пристрою струмового захисту чотирьохканального ГПС

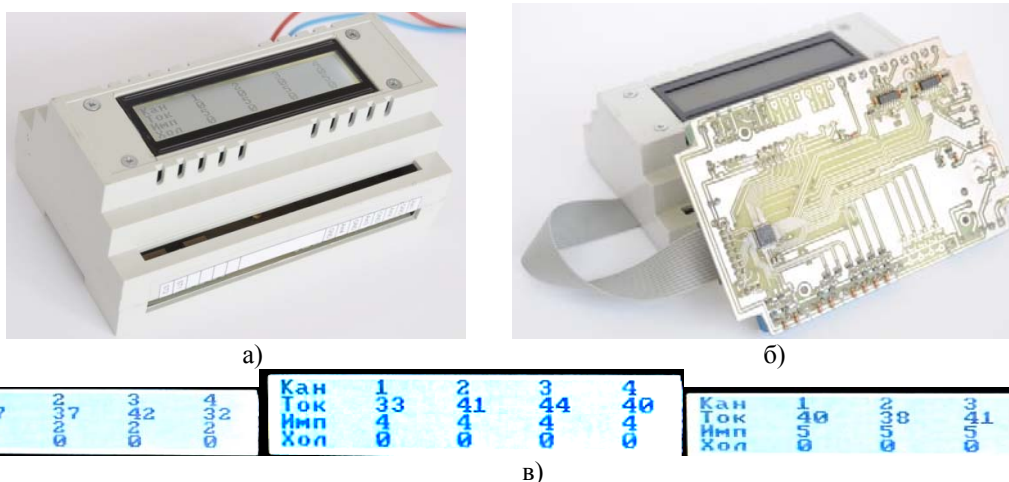


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд пристрою струмового захисту (а, б) та результати вимірювання розрядного струму і кількості зарахованих імпульсів в кожному з чотирьох каналів розряду при випробуваннях пристрою (в)

Висновки. Система контролю розрядного струму із запропонованою структурою і розроблений на її основі комплекс для струмового захисту генераторів імпульсних струмів дозволяє в режимі реального часу реагувати на коротке замикання в навантаженні і контролювати технологічний процес з заданою точністю вимірювання інформаційної координати. Випробування комплексу на експериментальній розрядноімпульсній установці показали надійну роботу системи контролю розрядного струму, розроблений комплекс може використовуватись в системах керування розрядноімпульсних технологій в умовах великих імпульсних струмів в електричних колах установок та наведених електромагнітних полях з великою густиною енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при электрическом разряде в жидкости / Е.В. Кривицкий, В.В. Шамко. – К.:Наук.думка.- 1979. - 208 с.
2. Гулый Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий / Г.А. Гулый. – К.:Наукова думка.- 1990. - 208с.
3. Назарова Н.С. Анализ статистической эффективности координат выходного вектора объекта управления / Н.С. Назарова // Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету. – 2001. - №1(373). - С.130-137.
4. Пат. 83379 Україна МПК7 G05B13/02. Спосіб автоматичного регулювання електроімпульсних установок та система для його здійснення / О.І.Вовченко, С.С.Козирев, Н.С.Назарова (Україна); заявник і патентовласник ШПТ НАН України. - № а 2006 033307; заявл. 27.03.2006; опубл. 10.07.2008, Бюл.№ 13.
5. Назарова Н.С. Методи підвищення енергоефективності розрядноімпульсної технології очищення виливків / Н.С. Назарова, В.В. Діордійчук // Технічна електродинаміка. – 2011.- №5 - С.68-73.
6. Дашук П.Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др. –М: Московская типография №4. – 1970. – 472 с.
7. Титце У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. М.: Мир.- 1982. – 512 с.

REFERENCES

- 1 Krivitskij E.V., Shamko V.V. Perekhodnye protsesy pri elektricheskom razryade v zhidkosti. Naukova dumka, 1979. 208 p.
- 2 Gulyi G.A. Osnovy razryadnoimpulsnyh tehnologij. Naukova dumka, 1990. 208 p.
- 3 Nazarova N.S. Analiz statisticheskoi effektivnosti koordinat vyhodnogo vektora objekta upravleniya. Zbirnyk naukovykh pratsc Ukrainyskogo derzhavnogo morskogo tehnicnogo universytetu. 2001; №1(373): 130-137.
- 4 Pat. 83379 Ukraïna MPK7 G05B13/02/ Sposib avtomatichnogo reguluvannya elektroimpulsnyh ustanovok ta sistema dlya jogo zdijsnennya. № a 2006 033307, 10.07.2008, Bul.№ 13
- 5 Nazarova N.S., Diordijchuk V.V. Metody pidvyshennya energoefektyvnosti razryadnoimpulsnoyi tehnologii ochyshennya vylyvkiv. Tehnicna elektrodynamika. 2011; №5: 68-73.
- 6 Dashuk P.N., Zajents.S.L, Komelkov V.S. i dr. Tehnika boljshih impulsnyh tokov I magnitnyh poley. Moskovskaya tipografiya.1970; №4: 472 p.
- 7 Titse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotehnika. M. Mir, 1982. 512 p.

Надійшла до редакції 10.03.2013

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

Д. В. ВИННИЧЕНКО¹, Н. С. НАЗАРОВА¹, И. Л. ВИННИЧЕНКО², Ю. О. АДАМЧУК²

¹ Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова

Электротехнический комплекс токовой защиты в высоковольтных генераторах импульсных токов. В работе показана возможность использования пояса Роговского в качестве датчика тока для комплекса токовой защиты в высоковольтных генераторах импульсных токов. Разработана архитектура и макетный образец четырех канального электротехнического комплекса, который испытан на экспериментальном четырехканальном генераторе импульсных токов для розрядноимпульсной установки.

Ключевые слова: пояс Роговского, генератор импульсных токов, архитектура, макетный образец, интегратор, амплитуда разрядного тока, электротехнический комплекс.

D. VINNYCHENKO¹, N. NAZAROVA¹, I. VINNYCHENKO², Y. ADAMCHUK²

¹ Institute of Pulse Processes and Technologies NAS of Ukraine

² National University of Shipbuilding Named by Admiral Makarov

Overcurrent Protection Electrical Complex in High Voltage Pulse Current Generators. Nowadays more and more spread acquire advanced technologies based on pulsed exposure to object processing, including pulse technology-based high electrical discharge (electroexplosion) in condensed media. Their basis is the process of converting electric field energy into mechanical work using pulse input energy discharge channel, which is formed in solid condensed medium (water). The discharge channel is used as a source of pulse pressure on object processing. The variation of the current in the discharge process carries information about the electroexplosion process, for example, can detect emergency situation (short circuit, idle level). Recent studies justifying the possibility of energy efficiency pulse technologies when applying the optimal control system, based on the criterion of minimizing loss function. This information includes coordinate amplitude discharge current. Implement a system can, if developed control system information on the number of pulses with a nominal discharge current and the number of pulses of current, below the critical (current idle bits). But the introduction of such systems pulse technologies constrained by factors such as large pulsed currents in electrical circuits and systems are electromagnetic fields with high energy density. The aim of the research is the study of structure control system discharge current and development complex for current protection pulse current generator and control process. When designing the structure of the control system discharge current taken into account such features as large pulse technologies pulsed currents in electrical circuits and systems are electromagnetic fields with large energy densities. A circuit solutions to ensure reliable operation of the control system discharge current and accident response. A set of electrical current protection Quaternary GIS that contains the system of collection, storage and processing of information about the bit currents flowing simultaneously or with a time run in each discharge channel, and automatic protection system of generator mode short circuit in the load. The device was tested on an experimental setup for driven pile pulse technology.

Key words: Rogowski coil, pulse current generator, architecture, scale-model, the integrator, the amplitude of the discharge current, an electrical complex.