

М.І. Баранов, С.Г. Буряковський

## Електротехнічне обладнання для генерування і вимірювання повного імпульсного струму штучної блискавки в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії

Приведені дані, які вказують на вирішення в НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ» проблемної науково-технічної задачі, пов'язаної з надійним генеруванням і вимірюванням в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії повного імпульсного струму штучної блискавки, що містить імпульсну *A*- (повторну імпульсну *D*-), проміжну *B*- і тривалу *C*- (укорочену тривалу *C*\*) компоненти даного струму, які відповідають технічним вимогам нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5414: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Вказані відомості про застосовані електричні схеми окремих високовольтних генераторів імпульсних струмів конденсаторного типу ГІС-А (ГІС-Д), ГІС-В і ГІС-С (ГІС-С\*), що синхронно працюють на загальне електричне навантаження у складі модернізованого потужного високовольтного генератора струму штучної блискавки типу УИТОМ-1, і використовані високовольтні вимірювальні засоби, які містять удосконалені низькоомні шунти типу ШК-300 для одночасної реєстрації за їх допомогою на випробовуваних на блискавкостійкість пристроях об'єктів авіаційної і ракетно-космічної техніки амплітудно-часових параметрів (АЧП) відповідних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки. Приведені технічні приклади і описані деякі результати практичного застосування вказаного модернізованого вітчизняного високовольтного електрофізичного обладнання при випробуваннях елементів вітчизняних літальних апаратів на стійкість до прямої дії на них основних компонент імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП. Бібл. 30, табл. 3, рис. 20.

**Ключові слова:** імпульсний струм штучної блискавки, модернізований високовольтний генератор струму блискавки, шунт, генерування, вимірювання, компоненти струму блискавки.

**Актуальність проблематики.** Пряма (непряма) дія потужних природних грозових довгих іскрових розрядів (блискавок) на об'єкти авіаційної і ракетно-космічної техніки в період їх знаходження в земній електрично активній атмосфері може приводити до аварійних пошкоджень їх металевих (композиційних) конструкційних частин (елементів) і незворотних відмов їх електроапаратури і бортових систем (наприклад, комп'ютерної техніки, систем керування, навігації і зв'язку), що може мати катастрофічні наслідки [1-7]. Не менш небезпечними є прямі удари блискавки і в наземні технічні об'єкти (наприклад, теле- і радіоантени, енергооб'єкти і їх повітряні лінії електропередачі) [1, 3, 8]. Основними чинниками пошкодження вказаних об'єктів при цьому є як потужні електромагнітні завади, що виникають від розповсюдження в повітрі сильнострумове плазмового каналу блискавки і які викликають появу в бортових (внутрішніх) електричних колах цих об'єктів великих електричних наведень (перенапруг і обумовлених ними ударних струмів), так і великі імпульсні струми, що протікають в зоні локальної прив'язки плазмового каналу блискавки на їх поверхнях і які характеризуються сильною електротермічною і електродинамічною дією [1, 3, 9]. У зв'язку з цим для блискавкозахисту вказаних технічних об'єктів застосовуються різні електротехнічні підходи і завадозахисні пристрої [1-3, 10, 11].

Згідно [4-9] надійним методом перевірки використовуваних електротехнічних підходів і завадозахисних пристроїв при забезпеченні блискавкозахисту обладнання і систем як літальних апаратів (ЛА), так і наземних об'єктів, є їх натурне випробування на пряму (непряму) дію потужних штучних грозових іскрових розрядів, відтворюваних в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії. Для практичної реалізації таких електромагнітних випробувань ЛА і інших технічних об'єктів необхідне відповідне потужне високовольтне випробувальне електрообладнання.

В [7, 9] вказана схема високовольтної електроустановки, яка дозволяє відповідно до технічних вимог стандарту НАТО АЕСТР-500: 2016 формувати на випробовуваних на блискавкостійкість різних пристроях і системах ЛА аперіодичний імпульс струму

часової форми 50 мкс/500 мкс з його амплітудою до  $\pm 10$  кА при постійній напрузі електричного заряду її конденсаторної батареї до  $\pm 2$  кВ. У той же час відповідно до технічних вимог нормативних документів США [12-14] при випробуваннях на блискавкостійкість бортових систем, складових частин і елементів ЛА потрібні інші амплітудно-часові параметри (АЧП) окремих компонент повного імпульсного струму штучної блискавки (табл. 1).

Таблиця 1\*

Нормовані АЧП основних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки [12-14]

Компонента струму блискавки	$I_{mL}$ , кА	$I_c$ , кА	$q_L$ , Кл	$J_a$ , $10^6$ Дж/Ом	$\tau_f$ , мкс	$\tau_{p1}$ , мс
<i>A</i>	200±20	–	–	2±0,4	≤50	≤0,5
<i>B</i>	–	2±0,4	10±1	–	–	5±0,5
<i>C</i>	0,2-0,8	–	200±40	–	–	(0,25-1)·10 <sup>3</sup>
<i>C</i> *	–	≥0,4	6-18	–	–	15-45
<i>D</i>	100±10	–	–	0,25±0,05	≤25	≤0,5

\*Примітка.  $I_{mL}$  – амплітуда імпульсу струму блискавки;  $I_c \approx q_L/\tau_p$  – середнє значення імпульсного струму;  $q_L$  – кількість заряду, що протікає в імпульсі струму;  $J_a$  – інтеграл дії імпульсу струму блискавки;  $\tau_f$ ,  $\tau_{p1}$  – відповідно тривалість фронту імпульсу струму між рівнями (0,1-0,9) $I_{mL}$  і тривалість імпульсу струму блискавки на рівні  $\leq 0,1I_{mL}$ .

При цьому слід вказати те, що згідно [12-14] залежно від зони ураження ЛА блискавкою в земній атмосфері її повний імпульсний струм в своєму складі може містити наступні основні складові, АЧП яких істотно відрізняються одна від однієї: імпульсну *A*- (повторну імпульсну *D*-), проміжну *B*- і тривалу *C*- (укорочену тривалу *C*\*) компоненти. Причому, в практиці електромагнітних випробувань на блискавкостійкість технічних пристроїв і бортових систем літаків цивільного і військового призначення найчастіше застосовуються наступні комбінації вказаних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки [9, 12-14]: *A*-, *B*- і *C*- компоненти (зона 3 ураження); *A*-, *B*- і *C*\*- компоненти (зона 1А ураження); *D*-, *B*- і *C*\*- компоненти (зона 2А ураження). Послідовність протікання для відповідних зон ураження ЛА в атмосферному повітрі грозовим розрядом цих компо-

© М.І. Баранов, С.Г. Буряковський

нент струму блискавки повинна відповідати вказаному вище порядку, а кожна з даних компонент струму блискавки повинна монотонно переходити в іншу.

Для виконання технічних вимог [12-14] в [15] приведена схема потужної високовольтної електроустановки, яка призначалася для випробувань бортових систем і елементів ЛА на блискавкостійкість. Практика експлуатації потужного генератора струму блискавки (ГСБ) згідно [15] виявила ряд технічних недоліків в його схемах побудови і роботі: недостатню захищеність використовуваних високовольтних конденсаторів у сумарній кількості в декілька сотень штук генераторів імпульсних струмів (ГІС) ГСБ від аварійних ударних струмів амплітудою до  $\pm 500$  кА в мікросекундному часовому діапазоні; відсутність рекомендацій по одночасному вибору довжин  $h_1-h_3$  ізоляційних повітряних проміжків у використовуваних високовольтних сильнострумових комутаторах ГІС при зміні рівнів їх зарядної електричної напруги  $U_c$ , а також довжини  $h_e$  повітряного проміжку між краєм електрично вибухаючого дроту (ЕВД) і випробовуваним зразком (ВЗ) ЛА; наявність випадків несинхронної паралельної роботи в схемах ГСБ його окремих генераторів ГІС-А, ГІС-Д, ГІС-В, ГІС-С\* і ГІС-С на загальне  $R_L L_L$  – навантаження ВЗ відповідного ЛА, що виключає отримання потрібних згідно вимог [12-14] випробувальних імпульсів струму штучної блискавки.

З даних табл. 1 для вказаних АЧП компонент повного імпульсного струму штучної блискавки і застосування необхідного для їх практичного отримання ГСБ, побудованого на базі окремих високовольтних ГІС конденсаторного типу, витікає, що розробка і створення подібного ГСБ в області високовольтної імпульсної техніки (ВІТ) є складною проблемною науково-технічною задачею. При цьому не менш складною задачею виявляється і та, яка пов'язана з одночасною реєстрацією з одного високовольтного вимірювального засобу відразу не менше трьох компонент імпульсного струму штучної блискавки з АЧП, що різко відрізняються одні від інших. Одним з непрямих підтверджень тому є те, що в даний час нам не відомі електротехнологічні схеми побудови і технічні конструкції подібних високовольтних ГСБ і засобів для вимірювання струму блискавки, які були приведені у відкритому друці провідних країн світу.

**Метою статті** є вирішення проблемної науково-технічної задачі по надійному генеруванню і вимірюванню в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії основних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП з використанням модернізованого ГСБ типу УИТОМ-1.

**1. Електротехнологічні схеми побудови потужного ГСБ типу УИТОМ-1.** На рис. 1 наведена модернізована електрична схема побудови потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 [16], що містить в своєму складі п'ять окремих високовольтних ГІС (ГІС-А, ГІС-Д, ГІС-В, ГІС-С і ГІС-С\*) з можливістю їх паралельної і надійної синхронної роботи на загальне низькоомне активно-індуктивне  $R_L L_L$  – навантаження у вибраному дослідником режимі формування на ньому відповідних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки. Необхідна комбінація заданих згі-

дно технічних вимог вказаних нормативних документів [12-14] компонент повного імпульсного струму штучної блискавки і відповідних їм потужних високовольтних ГІС здійснюється за допомогою електричних переключачів Х1-Х4 (рис. 1) і які допускають їх ручне включення або відключення зі схеми електромагнітних випробувань ВЗ.

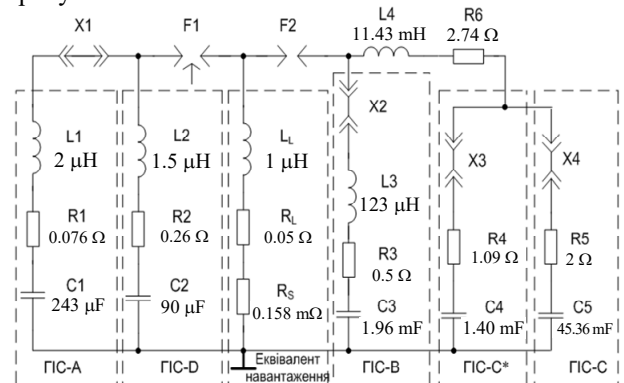


Рис. 1. Удосконалені електричні схеми побудови потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 з одним загальним електричним  $R_L L_L$  – навантаженням і розрядних кіл його окремих паралельно працюючих високовольтних генераторів ГІС-А, ГІС-Д, ГІС-В, ГІС-С і ГІС-С\* ( $F_1, F_2$  – три- і двоелектродний повітряні сильнострумові комутатори на номінальну постійну напругу  $\pm 50$  кВ і  $\pm 5$  кВ; Х1-Х4 – електричні переключачки;  $R_S \approx (0,158 \pm 0,005)$  Ом – активний опір вимірювального шунта типу ШК-300М1;  $R_1-R_5, L_1-L_3$  – власні електричні параметри розрядних кіл високовольтних генераторів ГІС-А, ГІС-Д, ГІС-В, ГІС-С\* і ГІС-С;  $R_6, L_4$  – електричні параметри формуючих  $RL$ - елементів для розрядних кіл високовольтних генераторів ГІС-С і ГІС-С\*) [16]

Відзначимо, що генератор ГІС-Д в удосконаленій схемі ГСБ типу УИТОМ-1 збирається з 30 паралельно з'єднаних імпульсних конденсаторів типу ИК-50-3, що входять до складу генератора ГІС-А. В зв'язку з цим при роботі ГІС-Д в електричній схемі ГСБ переключачка Х1 знімається і генератор ГІС-А вмикається з робочої схеми ГСБ (рис. 1). Це рішення дозволяє суттєво заощадити часові і матеріальні ресурси при створенні цього ГСБ.

При вибраній електричній схемі формування потрібних компонент, згідно вимог [12-14], повного імпульсного струму штучної блискавки надійна синхронізація роботи відповідних ГІС в ГСБ забезпечується за рахунок подачі від окремого високовольтного імпульсного генератора типу ГВЗІ-100 [16] на середній керуючий сталевий електрод трьохелектродного повітряного комутатора  $F_1$  (рис. 2) на номінальну постійну напругу  $\pm 50$  кВ високовольтного швидко згасаючого синусоїдального імпульсу напруги амплітудою  $\pm 100$  кВ мікросекундної тривалості, що викликає спрацювання як повітряного комутатора  $F_1$  (див. рис. 1, 2), так і двоелектродного повітряного комутатора  $F_2$  (рис. 3) на номінальну постійну напругу  $\pm 5$  кВ. Для забезпечення надійного спрацювання трьохелектродного комутатора  $F_1$  удосконаленого ГСБ полярність цього імпульсу напруги від генератора ГВЗІ-100 вибирається протилежною полярності заряду конденсаторних батарей використовуваних ГІС. Модернізована нами електротехнологічна схема вводу імпульсного струму штучної блискавки у ВЗ містить відповідно до вимог нормативних документів [12-14] тонкий

мідний ЕВД діаметром  $\sim 0,1$  мм завдовжки  $l \approx 50$  мм, відокремлений від поверхні ВЗ повітряним проміжком завдовжки  $h \approx 2$  мм. При електричному вибуху (ЕВ) тонкого ЕВД над поверхнею ВЗ в локальній зоні введення в нього заданих компонент струму імітованої блискавки від потужного ГСБ формується низькотемпературна плазма, через яку заряди заздалегідь заряджених високовольтних конденсаторних батарей ГПС перетікають в досліджуваній ВЗ. На рис. 4 за допомогою цифрової фотокамери типу Canon A-530 зафіксований момент синхронного спрацьовування вказаних повітряних комутаторів  $F_1$  і  $F_2$  та вибуху ЕВД в схемі формування за допомогою удосконаленого потужного ГСБ типу УИТОМ-1 (див. рис. 1) нормованих А-, В- і С\*- компонент повного струму штучної блискавки (зона 1А) у ВЗ одного з пристроїв вітчизняного ЛА [17].

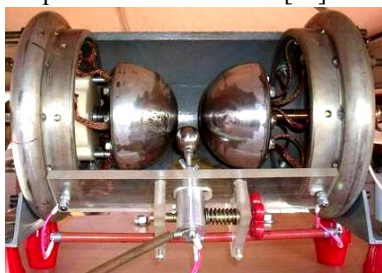


Рис. 2. Загальний вигляд високовольтного трьохелектродного сильнотривого повітряного комутатора  $F_1$  каскадного типу з масивними основними напівсферичними електродами із сталі марки Ст. 3 на номінальну постійну напругу  $\pm 50$  кВ та імпульсний струм амплітудою  $I_{ml}$  до  $\pm 300$  кА [16]



Рис. 3. Загальний вигляд високовольтного двоелектродного сильнотривого повітряного комутатора  $F_2$  з графітовими електродами прямокутної форми на номінальну постійну напругу  $\pm 5$  кВ та заряд  $q_L$  до  $\pm 300$  Кл, який розміщений в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1 [16]

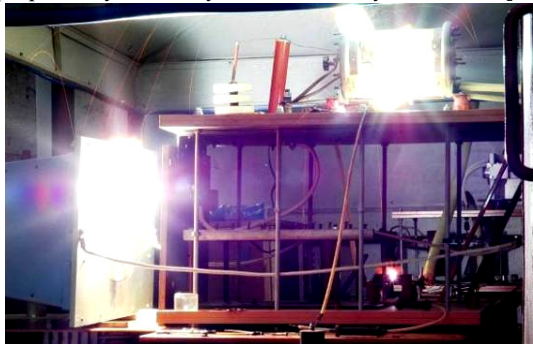


Рис. 4. Загальний вигляд робочого столу потужного модернізованого ГСБ типу УИТОМ-1 у момент синхронного електричного спрацьовування трьох заряджених потужних високовольтних випробувальних генераторів імпульсних струмів ГПС-А, ГПС-В і ГПС-С\* при випробуваннях на блискавкостійкість (зона 1А) ВЗ пристрою вітчизняного ЛА [17]

Вкажемо, що при зміні зарядної постійної напруги  $U_{c1}$  в потужних високовольтних генераторах ГПС-А і ГПС-В в діапазоні  $U_{c1} \approx \pm(28-33)$  кВ у трьохелектрод-

ному комутаторі  $F_1$  (рис. 2) довжини повітряних проміжків між його сталевими (двома основними і одним керуючим) електродами повинні чисельно складати  $h_1 \approx 4$  мм і  $h_2 \approx 9$  мм, а при зміні зарядної постійної напруги  $U_{c2}$  в високовольтних генераторах ГПС-В, ГПС-С і ГПС-С\* в діапазоні  $U_{c2} \approx \pm(3,6-4,5)$  кВ в двоелектродному комутаторі  $F_2$  (рис. 3) довжина повітряного проміжку між його графітовими електродами обирається рівною  $h_3 \approx 3$  мм [16]. При цьому фізичні умови для атмосферного повітря повинні відповідати [18]: тиск  $P_a \approx (1,013 \pm 0,015) \cdot 10^5$  Па; абсолютна температура  $T_a \approx (293,15 \pm 10)$  К; відносна вологість  $\beta_a \approx (45 \pm 25)$  %.

Відмітимо, що на рис. 4 зліва розміщений ВЗ пристрою ЛА з відповідним мідним ЕВД, що яскраво світиться при його ЕВ в розрядному колі потужного ГСБ і який підключено до непотенційного (заземленого) сталевих електрода комутатора  $F_1$  (рис. 1); вгорі бачимо жорстко закріпленій на робочому столі комутатор  $F_1$  потужного ГСБ з сильнотривовою імпульсною іскрою, що яскраво світиться; внизу робочого столу ГСБ показаний комутатор  $F_2$  з його імпульсним іскровим каналом, що теж яскраво світиться.

Рис. 4 візуально ілюструє правильність запропонованих і вказаних нами вище електротехнологічних рішень для забезпечення надійної синхронної паралельної роботи окремих високовольтних генераторів ГПС-А (ГПС-В), ГПС-В і ГПС-С (ГПС-С\*) при створенні модернізованого потужного ГСБ типу УИТОМ-1.

У табл. 2 вказані основні електротехнічні характеристики окремих високовольтних генераторів ГПС-А, ГПС-В, ГПС-С, ГПС-С\* і ГПС-В, які входять до складу удосконаленого потужного ГСБ типу УИТОМ-1.

Таблиця 2

Технічні характеристики генераторів ГПС-А, ГПС-В, ГПС-С, ГПС-С\* і ГПС-В, що входять до складу ГСБ типу УИТОМ-1

Найменування ГПС	Кількість конденсаторів, шт.	Тип конденсаторів	Сумарна ємність $C_{\Sigma}$ , мФ	Енергоємність $W_{\Sigma}$ , кДж
ГПС-А	111	ИК-50-3	0,333	416,2
ГПС-В	14	ИМ-6-140	1,96	24,5
ГПС-С	324	ИМ-5-140	45,36	567,0
ГПС-С*	10	ИМ-6-140	1,4	17,5
ГПС-В	30	ИК-50-3	0,09	112,5

З даних табл. 2 витікає, що загальна кількість високовольтних імпульсних конденсаторів з металевим корпусом трьох типів (ИК-50-3, ИМ-6-140 і ИМ-5-140 [19]) у потужному ГСБ типу УИТОМ-1 складає 489 шт. При цьому сумарна номінальна електрична енергія  $W_{\Sigma}$ , що запасється високовольтними імпульсними конденсаторами цього ГСБ, дорівнює  $W_{\Sigma} \approx 1,25$  МДж. При цій енергії 1 кДж електричної енергії, що запасється потужним високовольтним електрофізичним обладнанням конденсаторного типу, рівної для прикладного випадку формування ним на електричному навантаженні імпульсних струмів мікро- і мілісекундної тривалості приблизно 1000 \$ [20-22], вартість спорудження подібного потужного високовольтного ГСБ складатиме не менше 1,25 млн. \$. Як бачимо, розробка і створення потужного високовольтного сильнотривого ГСБ типу УИТОМ-1 (рис. 5) пов'язано не тільки із значними науково-технічними труднощами, але і з великими грошовими витратами.



Рис. 5. Загальний вигляд удосконаленого потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 (на передньому плані знаходиться робочий стіл з трьохелектродним комутатором  $F_1$  на номінальну постійну напругу  $\pm 50$  кВ і системою повітряної витяжки, а на задньому плані – окремі високовольтні потужні генератори ГС-А (ГС-Д), ГС-В, ГС-С і ГС-С\*)

Важливо вказати те, що в удосконаленому ГСБ типу УИТОМ-1 всі високовольтні імпульсні конденсатори генераторів ГС-А, ГС-Д, ГС-В, ГС-С і ГС-С\*, оснащені резистивними системами їх захисту від дії аварійних ударних струмів в ГСБ [23].

Дані системи надійного захисту імпульсних конденсаторів у модернізованому ГСБ базуються на застосуванні високовольтних постійних графіто-керамічних резисторів типу ТВО-60 номіналом 24 Ом і 100 Ом [24], які різко обмежують в аварійних режимах роботи ГСБ (наприклад, при електричному пробі внутрішньої або зовнішньої ізоляції його імпульсних конденсаторів) ударні імпульсні струми і розсіюють теплову енергію, що виділяється при цьому на них.

Завдяки:

- виконаній модернізації згідно технічним рішенням [23] з резистивних схем захисту від аварійних ударних імпульсних струмів розрахунковою амплітудою до  $\pm 500$  кА високовольтних імпульсних конденсаторів окремих потужних генераторів ГС-А (ГС-Д), ГС-В, ГС-С і ГС-С\* (табл. 2),

- удосконаленню схеми керованого електричного запуску від окремого високовольтного генератора типу ГВЗІ-100 [16] трьохелектродного повітряного комутатора  $F_1$  (рис. 2) і двоелектродного повітряного комутатора  $F_2$  (рис. 3),

- рекомендованому одночасному вибору довжин  $h_1-h_3$  повітряних проміжків у використовуваних високовольтних комутаторах  $F_1$  і  $F_2$  сильноточових розрядних кіл вказаних ГС та довжини  $h_e$  повітряного проміжку між краєм ЕВД і ВЗ об'єкту, модернізований ГСБ типу УИТОМ-1, не дивлячись на подібність використаних раніше в ГСБ [15] електротехнологічних схем побудови у ньому розрядних кіл відповідних ГС (рис. 1), має суттєву відмінність від ГСБ, який був запропонований в [15]. Ця відмінність потужних високовольтних ГСБ забезпечує більш надійну роботу модернізованого ГСБ типу УИТОМ-1 у порівнянні з ГСБ [15] при генеруванні імпульсів повного струму штучної блискавки (табл. 1) згідно технічних вимог [12-14].

**2. Результати вимірювання основних компонент струму штучної блискавки в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1.** В [25, 26] приведені основні методи вимірювання над- і високої імпульсної напруги в електроустановах при випробуваннях різного електротехнічного і електроенергетичного обладнання. Що стосується методів вимірювання в області ВІТ великих імпульсних струмів (ВІС), то певні технічні прийо-

ми і засоби для цього були приведені в [20-22, 27, 28]. На жаль, для практичної реалізації складних метрологічних задач стосовно одночасного вимірювання ряду компонент повного імпульсного струму блискавки в потужному ГСБ типу УИТОМ-1, приведених в [20-22, 27, 28] матеріалів і даних по високовольтним вимірювальним засобам, призначеним для одночасної реєстрації за допомогою одного вимірника відразу як ВІС (з амплітудою  $I_{mL}$  в десятки і сотні кілоампер), так і відносно слабких імпульсних струмів (з амплітудою  $I_{mL}$  в сотні і десятки ампер) в широкому часовому інтервалі їх протікання в розрядних колах його ряду паралельно працюючих ГС (від одиниць мікросекунд до сотень мілісекунд), виявилось недостатньо. У зв'язку з цим авторам довелося самостійно розробляти, створювати і модернізувати нестандартизовані високовольтні сильноточові вимірники подібних електричних імпульсних струмів, які на загальному електричному  $R_L L_L$  – навантаженні при спрацьовуванні окремих високовольтних ГС даного ГСБ здатні надійно реєструвати необхідні компоненти імпульсного струму штучної блискавки [16, 17, 29, 30].

На рис. 6-10 зображені основні типові осцилограми імпульсної А-, проміжної В-, тривалої С-, укороченої тривалої С\*- і повторної імпульсної D- компонент повного імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП згідно [12-14], які були отримані в сильноточовому розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1, що містить випробовувані на блискавкостійкість ВЗ з алюмінієвого сплаву Д16 обшивки паливного бака одного з модернізованих вітчизняних літаків «Ан» [17].

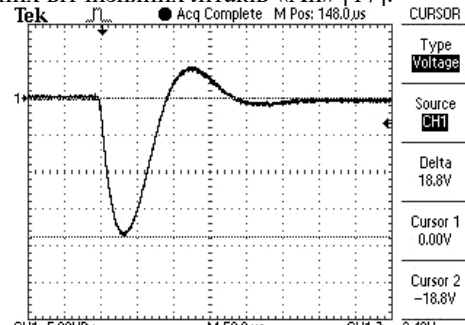


Рис. 6. Осцилограма імпульсної А- компоненти струму штучної блискавки з нормованими АЧП в розрядному колі генератора ГС-А потужного ГСБ типу УИТОМ-1 ( $U_{c1} \approx 29,7$  кВ;  $I_{mA1} \approx 211,7$  кА;  $J_{aA} \approx 2,09 \cdot 10^6$  Дж/Ом;  $t_{mA1} \approx 32$  мкс – час, який відповідає першій амплітуді  $I_{mA1}$ ;  $\tau_{fA} \approx t_{mA1} / 1,6 \approx 20$  мкс;  $\tau_{p1A} \approx 500$  мкс; масштаб за вертикаллю – 56,3 кА/діл; масштаб за горизонталлю – 50 мкс/діл)

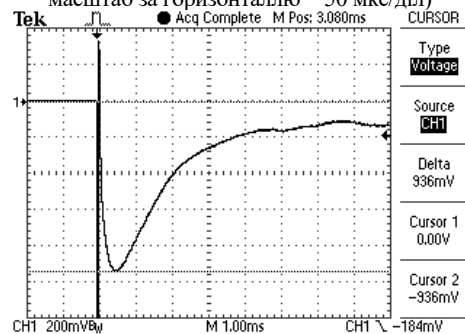


Рис. 7. Осцилограма проміжної В- компоненти струму штучної блискавки з нормованими АЧП в сильноточовому розрядному колі високовольтного генератора ГС-В потужного ГСБ типу УИТОМ-1 ( $U_{c2} \approx 4$  кВ;  $I_{mB} \approx 5,27$  кА;  $I_{cB} \approx 2,08$  кА;  $q_{LB} \approx 10,4$  Кл;  $\tau_{p1B} \approx 5$  мс; масштаб за вертикаллю – 1126 А/діл; масштаб за горизонталлю – 1 мс/діл)

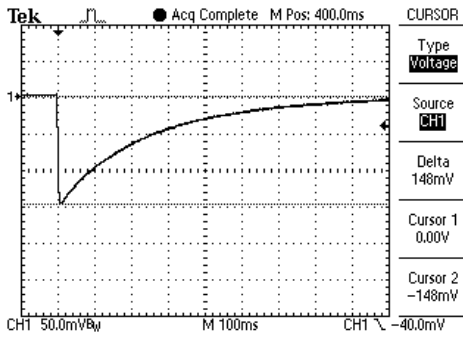


Рис. 8. Осцилограма тривалої  $C$ -компоненти повного струму штучної блискавки з нормованими АЧП в розрядному колі високовольтного генератора ГС-С потужного ГСБ типу УИТОМ-1 ( $U_{c2} \approx 4$  кВ;  $I_{mc} \approx 833$  А;  $q_{LC} \approx 186,2$  Кл;  $\tau_{pc} \approx 7$  мс;  $\tau_{p1c} \approx 1000$  мс; масштаб за вертикаллю – 281,5 А/діл;

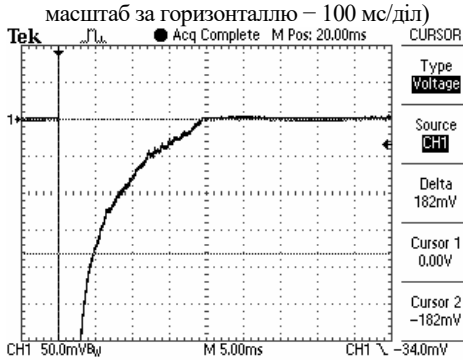


Рис. 9. Осцилограма укороченої тривалої  $C^*$ -компоненти повного імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП в розрядному колі високовольтного генератора ГС- $C^*$  потужного ГСБ типу УИТОМ-1 ( $U_{c2} \approx 4$  кВ;  $I_{mc} \approx 1148$  А;  $\tau_{pc} \approx 14,8$  мс;  $q_{LC} \approx 6,16$  Кл;  $I_{c^*} \approx q_{LC} / \tau_{pc} \approx 416$  А)

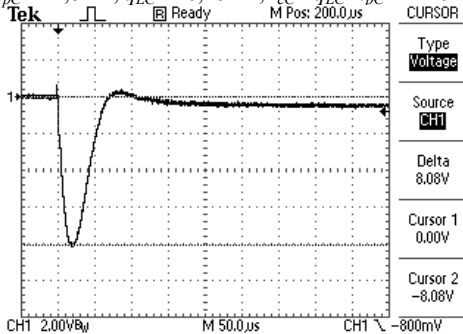


Рис. 10. Осцилограма повторної імпульсної  $D$ -компоненти повного імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП в розрядному колі генератора ГС- $D$  потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 ( $U_{c1} \approx 33$  кВ;  $I_{mD1} \approx 102$  кА;  $t_{mD1} \approx 20$  мкс – час, що відповідає амплітуді  $I_{mD1}$ ;  $\tau_{pD} \approx t_{mD1} / 1,6 \approx 12,5$  мкс;  $\tau_{p1D} \approx 500$  мкс;  $J_{ad} \approx 0,26 \cdot 10^6$  Дж/Ом)

Потужний високовольтний ГСБ типу УИТОМ-1 укомплектований декількома сильноточними вимірниками (удосконаленими дисковими коаксіальними низькоомними шунтами типу ШК-300) компонент імпульсного струму штучної блискавки, основні технічні характеристики яких приведені в табл. 3.

Новизна наведених на рис. 6-10 осцилограм полягає в тому, що вони отримані на вказаному ВЗ за допомогою модернізованих як електротехнологічних схем формування в розрядному колі ГСБ типу УИТОМ-1 цих компонент повного імпульсного струму штучної блискавки, так і високовольтних вимірювальних засобів, які базуються на сильноточних низькоомних шунтах типу ШК-300 (табл. 3). Зазначимо, що для од-

ночасного вимірювання декількох компонент повного імпульсного струму штучної блискавки, що генерується в розрядному колі удосконаленого високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1, було потрібно розробити і створити вимірювальний узгоджувальний спеціальний подільник напруги (СПН), який підключається на виході використовуваної при подібних високовольтних вимірюваннях кабельної лінії зв'язку (рис. 11).

Виконана нами модернізація вимірювальних засобів полягала в тому, щоб виключити при вимірюванні в розрядному колі високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 відповідних компонент струму штучної блискавки попадання високого електричного потенціалу в канали цифрових запам'ятовуючих осцилографів (ЦЗО). Як відомо, подача такого потенціалу на вхід ЦЗО приводить до його виходу з ладу. Було запропоновано таке нове технічне рішення: радіочастотний коаксіальний кабель завдовжки  $l_c$  лінії зв'язку, яка з'єднує вимірювальний шунт типу ШК-300 з СПН і ЦЗО, потрібно розміщувати в додатковому мідному екрані-обплітенні, який перед СПН необхідно надійно заземлювати.



Рис. 11. Загальний вигляд високовольтного вимірювального шунта типу ШК-300М, приєднаного до входу додатково екранованого радіочастотного коаксіального кабелю марки РК 75-7-11 завдовжки  $l_c \approx 70$  м, вихід якого підключається до входу екранованого узгоджувального подільника напруги СПН-300 з двома вихідними коаксіальними роз'ємами 1:1 і 1:2 для узгодженого приєднання до них вимірювальних каналів трьох ЦЗО (наприклад, серії Tektronix TDS 1012) при одночасній реєстрації в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1 відразу трьох компонент повного імпульсного струму штучної блискавки з різними АЧП [16]

Таблиця 3\*

Основні технічні характеристики високовольтних сильноточних шунтів типу ШК-300М, ШК-300М1 і ШК-300М2

Найменування шунта	Значення характеристики			
	$R_S$ , мОм	$K_S$ , А/В	$L_S$ , нГн	Маса, кг
ШК-300М	0,178±0,005	$K_{SA} \approx 11260$	10±0,3	3,0
		$K_{SC} \approx 5630$		
ШК-300М1	0,158±0,005	$K_{SA} \approx 12625$	10±0,3	3,1
		$K_{SC} \approx 6312$		
ШК-300М2	0,080±0,003	$K_{SA} \approx 25000$	10±0,3	3,2
		$K_{SC} \approx 12500$		

\*Примітка.  $R_S$ ,  $L_S$  – активний опір (мОм) і індуктивність (нГн) шунта;  $K_S \approx 2/R_S$  – коефіцієнт перетворення шунта, А/В;  $K_{SA}$  – коефіцієнт перетворення шунта при вимірюванні в розрядному колі ГСБ типу УИТОМ-1 АЧП  $A$ - і  $D$ -компонент струму штучної блискавки, А/В (з роз'єму 1:1 подільника типу СПН-300 [16]);  $K_{SC}$  – коефіцієнт перетворення шунта при вимірюванні в розрядному колі ГСБ типу УИТОМ-1 АЧП  $B$ -,  $C$ - і  $C^*$ -компонент струму штучної блискавки, А/В (з роз'єму 1:2 подільника типу СПН-300 [16]).

На рис. 12 приведена електрична схема узгодженого підключення високовольтного шунта типу ШК-300М1 зі своїм вимірювальним коаксіальним резистором (ВКР) до вимірювального коаксіального кабелю (ВКК), СПН і відповідних ЦЗО.

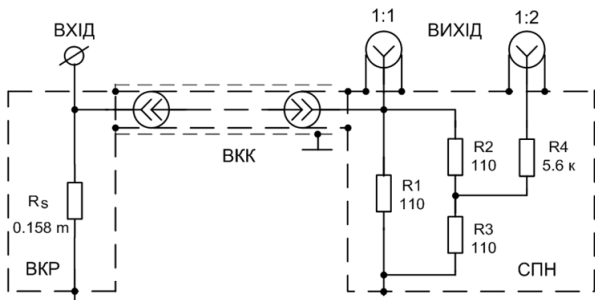


Рис. 12. Принципова електрична схема підключення високовольтного шунта типу ШК-300М1 до низьковольтного вимірювального кола кабельної лінії зв'язку і ЦЗО (ВКР шунта з активним опором  $R_S \approx 0,158$  мОм, що підключається до входу кабелю лінії зв'язку; ВКК марки РК 75-7-11 триаксальної лінії зв'язку; СПН, який узгоджує роботу шунта, ВКК і входів ЦЗО та підключається до виходу ВКК, що передає із зони сталевого диска шунта електричний сигнал до СПН і ЦЗО)

Згідно рис. 12 бачимо, що на виході кабелю ВКК, додатковий мідний циліндричний екран якого перед СПН надійно заземляється, приєднується СПН, що узгоджує роботу шунта, ВКК та входів ЦЗО і який виконаний із зосереджених резисторів R1–R3 номіналом 110 Ом з сумарним активним опором, рівним хвилевому опору кабелю ВКК  $Z_c \approx 75$  Ом. Задачею СПН, застосованого в колі високовольтного шунта типу ШК-300М1, є забезпечення не тільки узгодженого режиму роботи вимірювального кола цього шунта, але і одночасна реестрація відразу декількох осцилограм відповідних компонент повного струму штучної блискавки мікро- і мілісекундної тривалості із значеннями амплітуд, що різко відрізняються. З цією метою даний СПН був забезпечений двома вихідними коаксіальними роз'ємами 1:1 і 1:2 (рис. 12).

Для посилення взаємної розв'язки коаксіальних роз'ємів 1:1 і 1:2 в СПН шляхом збільшення вхідного опору вихідного роз'єму 1:2 в його потенційний електрод електрично увімкнений додатковий зосереджений резистор R4 номіналом 5,6 кОм (див. рис. 12). При цьому СПН виконується у вигляді окремого низьковольтного пристрою, що приєднується до виходу коаксіального кабелю ВКК додатково екранованої триаксальної лінії зв'язку і розміщується в екранованому металевому корпусі (див. рис. 11), який потрібно надійно ізолювати від заземленого краю додаткового мідного циліндричного екрану ВКК.

У подільнику напруги типу СПН-300 (рис. 11) є два коаксіальних роз'єми 1:1 і 1:2, які призначені для узгодженого приєднання відповідних виходів до входів вимірювальних каналів ЦЗО. При цьому, згідно табл. 3, вказані роз'єми 1:1 і 1:2 СПН-300 характеризуються різними коефіцієнтами перетворення  $K_S$  використовуваних вимірювальних шунтів при реестрації за їх допомогою АЧП як  $A$ - і  $D$ - компонент струму штучної блискавки (в цьому випадку вони позначаються як  $K_{SA}$ ), так і  $B$ -,  $C$ - і  $C^*$ - компонент струму штучної блискавки (в цьому випадку вони позначаються як  $K_{SC}$ ).

На рис. 13 приведений загальний вигляд удосконаленого вимірювального сильноточного дискового шунта типу ШК-300М1, використовуваного в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1.



Рис. 13. Загальний вигляд високовольтного вимірювального шунта типу ШК-300М1, увімкненого до колектора сильноточного розрядного кола потужного ГСБ типу УИТОМ-1

Коаксіальні конструкції вимірювальних шунтів типу ШК-300 (табл. 3), що застосовані у складі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1, характеризуються малими значеннями їх власних електричних параметрів – індуктивності  $L_S$  (не більше 11 нГн) і активного опору  $R_S$  (не більше 0,2 мОм), що забезпечує малий вплив  $R_S L_S$ - параметрів вимірювальних шунтів на електромагнітні процеси, які протікають в  $R_L L_L$  – навантаженні (див. рис. 1).

На рис. 14 схематично зображено конструкцію вимірювального високовольтного сильноточного шунта типу ШК-300М2 в його подовжньому розрізі.

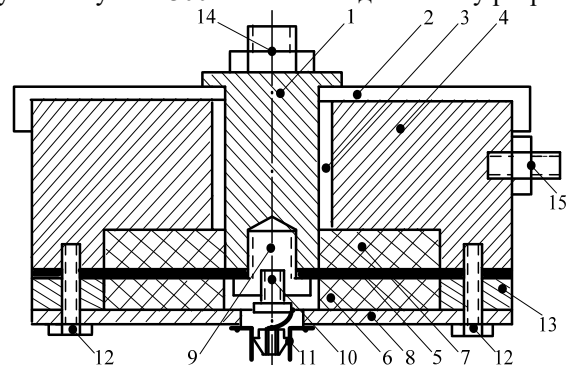


Рис. 14. Схематичне зображення удосконаленої конструкції високовольтного коаксіального дискового шунта типу ШК-300М2 в його подовжньому осьовому розрізі (1 – масивний внутрішній циліндричний латунний електрод; 2, 3 – ізоляційні втулки з фторопласту; 4 – масивний зовнішній циліндричний латунний електрод; 5 – вимірювальний високоомний сталевий диск завтовшки  $h_S=2$  мм; 6, 7 – масивні притискні ізоляційні диски; 8 – бандажний латунний диск; 9, 10, 12 – сталеві гвинти кріплення; 11 – вихідний коаксіальний роз'єм типу СР-75; 13 – масивне притискне латунне кільце; 14, 15 – вхідні (потенційні) і вихідні (заземлені) елементи латунного болтового приєднання шунта до сильноточного розрядного кола потужного ГСБ типу УИТОМ-1

Суттєвою відмінністю удосконалених конструкцій високовольтних сильноточних шунтів типу ШК-300М1 і ШК-300М2 [16, 29, 30] від вказаного в [15] шунта типу ШК-300М є застосування замість тонкостінного (завтовшки  $h_S \approx 0,3$  мм) високоомного манганінового диска, що піддається величезним електротермічним і електродинамічним ударним діям вимірюваних в розрядному колі ГСБ потужних імпульсів повного струму штучної блискавки і з якого знімається падіння імпульсної напруги  $U_S$  від проходження по ньому відповідних компонент імпульсного струму штучної блискавки, диска завтовшки  $h_S=(1-2)$  мм з неіржавіючої сталі марки 12Х18Н10Т. Практика екс-

платуації вимірювального шунта типу ШК-300М з манганіновим диском у складі ГСБ згідно [15] показала, що після ~100 вимірювань його диск не витримує подальшої дії потужних електротермічних навантажень і він виходить з ладу.

Використовуючи дані табл. 3 і чисельні показники (у долях або одиницях вольт) зареєстрованого на екрані ЦЗО за допомогою високовольтного вимірювального шунта відповідного типу падіння імпульсної напруги  $U_S$ , шукане значення сили  $I_L$  імпульсного струму штучної блискавки, що генерується і вимірюється в лабораторних умовах в колі ГСБ, визначаємо у вигляді:  $I_L \approx K_S U_S$ .

При розшифруванні отриманих в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1 осцилограм (рис. 6-10) основних компонент імпульсного струму штучної блискавки і визначенні чисельних значень їх АЧП можуть бути використані наступні розрахункові аналітичні співвідношення:

- для синусоїдального загасаючого струму в колі розряду модернізованого ГСБ типу УИТОМ-1:

- при розрахунках інтегралів дії  $J_{aA}$  і  $J_{aD}$  відповідно для  $A$ - і  $D$ - компонент струму штучної блискавки:

$$J_{aA} \approx k_A^2 I_{mA1}^2 [T_A (4\Delta_A)^{-1} - \Delta_A T_A / (4\Delta_A^2 + 16\pi^2)]; \quad (1)$$

$$J_{aD} \approx k_D^2 I_{mD1}^2 [T_D (4\Delta_D)^{-1} - \Delta_D T_D / (4\Delta_D^2 + 16\pi^2)], \quad (2)$$

де  $I_{mA1}(I_{mD1})$ ,  $I_{mA3}(I_{mD3})$ ,  $T_A(T_D)$ ,  $\Delta_A(\Delta_D)$  – відповідно перша і третя амплітуди струму  $I_A(I_D)$ , період і логарифмічний декремент коливань для імпульсної  $A$ - і повторної імпульсної  $D$ - компонент струму штучної блискавки;  $\Delta_A = \ln(I_{mA1}/I_{mA3})$ ,  $\Delta_D = \ln(I_{mD1}/I_{mD3})$  – відповідно логарифмічний декремент коливань для імпульсної  $A$ - і повторної імпульсної  $D$ - компонент струму штучної блискавки;  $k_A = [\exp(-0,5\pi^{-1}\Delta_A \arctg 0,5\pi^{-1}\Delta_A) \sin(\arctg 0,5\pi^{-1}\Delta_A)]^{-1}$ ,  $k_D = [\exp(-0,5\pi^{-1}\Delta_D \arctg 0,5\pi^{-1}\Delta_D) \sin(\arctg 0,5\pi^{-1}\Delta_D)]^{-1}$  – відповідно нормуючі коефіцієнти для імпульсної  $A$ - і повторної імпульсної  $D$ - компонент повного імпульсного струму штучної блискавки;

- при розрахунках електричних зарядів  $q_{LA}$  і  $q_{LD}$  відповідно для синусоїдальних  $A$ - і  $D$ - компонент повного імпульсного струму штучної блискавки:

$$q_{LA} \approx 2\pi k_A I_{mA1} T_A / (\Delta_A^2 + 4\pi^2); \quad (3)$$

$$q_{LD} \approx 2\pi k_D I_{mD1} T_D / (\Delta_D^2 + 4\pi^2). \quad (4)$$

- для аперіодичного імпульсного струму в розрядному колі потужного ГСБ при  $R_{1(2)} \geq 2[L_{1(2)}/C_{1(2)}]^{1/2}$ :

- при розрахунках інтегралів дії  $J_{aA}$  і  $J_{aD}$  для аперіодичних  $A$ - і  $D$ - компонент струму блискавки:

$$J_{aA} \approx k_A^2 I_{mA1}^2 [0,658\tau_{pA} - 0,633\tau_{fA}]; \quad (5)$$

$$J_{aD} \approx k_D^2 I_{mD1}^2 [0,658\tau_{pD} - 0,633\tau_{fD}], \quad (6)$$

де  $I_{mA}(I_{mD})$  – відповідно амплітуди аперіодичних імпульсної  $A$ - і повторної імпульсної  $D$ - компонент повного струму штучної блискавки;  $\tau_{fA}(\tau_{fD})$  – відповідно тривалість фронту імпульсів  $A$ - і  $D$ - компонент повного струму блискавки на їх рівні  $(0,1-0,9)I_{mA}$  або  $(0,1-0,9)I_{mD}$ ;  $\tau_{pA}(\tau_{pD})$  – відповідно тривалість імпульсів  $A$ - і  $D$ - компонент повного струму штучної блискавки на їх рівні  $0,5I_{mA}$  або  $0,5I_{mD}$ ;  $k_A = [(\alpha_{1A}/\alpha_{2A})^n - (\alpha_{1A}/\alpha_{2A})^m]^{-1}$ ,  $k_D = [(\alpha_{1D}/\alpha_{2D})^l - (\alpha_{1D}/\alpha_{2D})^k]^{-1}$  – відповідно нормуючі коефіцієнти для аперіодичних імпульсної  $A$ - і повторної імпульсної  $D$ - компонент повного імпульсного

струму штучної блискавки;  $\alpha_{1A} \approx 0,76/\tau_{pA}$ ;  $\alpha_{2A} \approx 2,37/\tau_{fA}$ ;  $\alpha_{1D} \approx 0,76/\tau_{pD}$ ;  $\alpha_{2D} \approx 2,37/\tau_{fD}$ ;  $n = \alpha_{1A}/(\alpha_{2A} - \alpha_{1A})$ ;  $m = \alpha_{2A}/(\alpha_{2A} - \alpha_{1A})$ ;  $l = \alpha_{1D}/(\alpha_{2D} - \alpha_{1D})$ ;  $k = \alpha_{2D}/(\alpha_{2D} - \alpha_{1D})$ ;

- при розрахунках електричних зарядів  $q_{LA}$  і  $q_{LD}$  відповідно для аперіодичних  $A$ - і  $D$ - компонент повного імпульсного струму штучної блискавки:

$$q_{LA} \approx k_A I_{mA1} [1,315\tau_{pA} - 0,422\tau_{fA}]; \quad (7)$$

$$q_{LD} \approx k_D I_{mD1} [1,315\tau_{pD} - 0,422\tau_{fD}]. \quad (8)$$

Вкажемо, що формули (7) і (8) можна використовувати при розрахунках відповідних АЧП для проміжної  $B$ -, тривалої  $C$ - і укороченої тривалої  $C^*$ - компонент повного імпульсного струму штучної блискавки.

**3. Технічні приклади і результати випробувань на блискавкостійкість деяких пристроїв ЛА на потужному ГСБ типу УИТОМ-1.** На рис. 15 приведені результати прямої ударної одночасної дії в сильнотривалому розрядному колі модернізованого ГСБ типу УИТОМ-1 на ВЗ листової обшивки ЛА з алюмінієвого сплаву марки АМг2М завтовшки  $h=1$  мм імпульсної  $A$ - і тривалої  $C$ - компонент імпульсного струму штучної блискавки з нормованими АЧП.

На рис. 16 зображені результати вказаної згідно рис. 15 руйнівної електротермічної дії на ВЗ листової обшивки ЛА з алюмінієвого сплаву марки АМг2М завтовшки  $h = 1$  мм імпульсної  $A$ - і тривалої  $C$ - компонент струму штучної блискавки з відповідними нормованими АЧП з боку його внутрішньої поверхні.

На рис. 17 приведені результати випробувань на блискавкостійкість (зона ураження  $1A$ ) в розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 ВЗ завтовшки  $h = 1,2$  мм плоскої дюралюмінієвої панелі обшивки паливного бака вітчизняного літака «Ан».

На рис. 18 представлені результати прямої дії в розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 тільки імпульсної  $A$ - компоненти штучної блискавки з нормованими згідно вимог [12-14] АЧП на ВЗ композиційної обшивки літака.

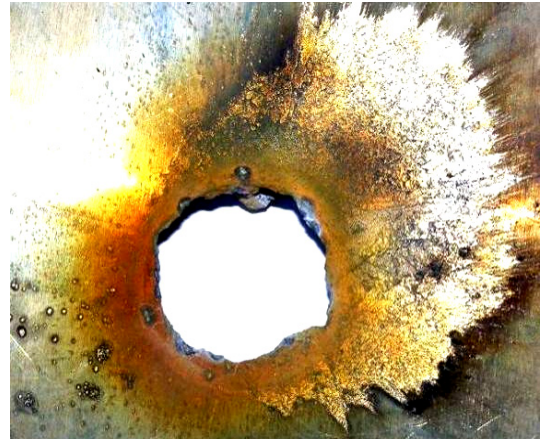


Рис. 15. Загальний вигляд зовнішньої округлої зони кризного протоплювання радіусом  $r_c \approx 13$  мм листового ВЗ при випробуванні на блискавкостійкість обшивки ЛА з алюмінієвого сплаву марки АМг2М завтовшки  $h=1$  мм від сумісної дії на нього в розрядному колі потужного ГСБ типу УИТОМ-1 імпульсної  $A$ - ( $I_{mA1} \approx 216$  кА;  $t_{mA1} \approx 32$  мкс – час, який відповідає першій амплітуді  $I_{mA1}$  імпульсу струму;  $\tau_{p1} \approx 500$  мкс;  $J_{a1} \approx 2,19 \cdot 10^6$  Дж/Ом) і тривалої  $C$ - ( $I_{mC} \approx 869$  А;  $t_{mC} \approx 11$  мс – час, який відповідає амплітуді  $I_{mC}$  імпульсу струму;  $\tau_{fC} \approx 7$  мс;  $\tau_{p1} \approx 1000$  мс;  $q_{LC} \approx 194,3$  Кл) компонент повного струму штучної блискавки з нормованими АЧП



Рис. 16. Загальний вигляд внутрішньої округлої зони крізного пропалювання листового ВЗ при випробуванні на блискавкостійкість обшивки ЛА з алюмінієвого сплаву марки АМг2М завтовшки  $h=1$  мм від сумісної дії на нього в розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 імпульсної  $A$ - і тривалої  $C$ - компонент повного струму штучної блискавки з нормованими АЧП



Рис. 17. Загальний вигляд з боку зони прив'язки результатів крізного пропалювання на зовнішній поверхні ВЗ плоскої дюралюмінієвої панелі завтовшки  $h=1,2$  мм обшивки паливного бака вітчизняного літака «Ан» плазмового каналу імітованого в розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 штучного грозового розряду радіусом  $r_s \approx 3,7$  мм його стінки від прямої дії нормованих  $A$ - ( $I_{mA1} \approx 199,5$  кА;  $t_{mA1} \approx 42$  мкс;  $\tau_{p1A} \approx 500$  мкс;  $J_{aA} \approx 1,99 \cdot 10^6$  Дж/Ом),  $B$ - ( $I_{mB} \approx 6,16$  кА;  $I_{cB} \approx 2220$  А;  $q_{LB} \approx 11,1$  Кл;  $\tau_{p1B} \approx 5$  мс) і  $C^*$ - ( $I_{mC^*} \approx 1112$  А;  $\tau_{p1C^*} \approx 13,6$  мс;  $q_{LC^*} \approx 5,79$  Кл;  $I_{cC^*} \approx q_{LC^*} / \tau_{p1C^*} \approx 426$  А) компонент повного імпульсного струму штучної блискавки (зона ураження 1А) [17]



Рис. 18. Загальний вигляд зони пошкодження діаметром до 100 мм з наскрізним пропалюванням в листовому ВЗ завтовшки  $h=2,9$  мм експериментальної композиційної обшивки літака, випробовуваному на блискавкостійкість в розрядному колі потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1, при прямій дії на нього тільки імпульсної  $A$ - компоненти струму штучної блискавки з нормованими АЧП ( $I_{mA1} \approx 212$  кА;  $t_{mA1} \approx 32$  мкс;  $\tau_{p1A} \approx 500$  мкс;  $J_{aA} \approx 2,11 \cdot 10^6$  Дж/Ом) [16].

Рис. 15-18 наочно вказують на те, що високоенергетичної електротермічної дії від сильнострумового каналу штучної блискавки з нормованими АЧП її основних компонент струму вказані дослідні листові металеві і композиційні зразки ЛА не витримують.

Для відображення комплексного характеру виконуваних натурних електромагнітних досліджень на модернізованому ГСБ типу УИТОМ-1 на рис. 19, а, б показані результати прямої дії в розрядному колі цього високовольтного сильнострумового ГСБ на виготовлену в заводських умовах дослідну модель приймально-передавальної антени літака вітчизняного виробництва потужної імпульсної  $A$ - компоненти струму штучної блискавки з нормованими АЧП.



Рис. 19. Загальний вигляд дослідної моделі авіаційної приймально-передавальної антени ЛА до (а) і після (б) прямої дії на неї в сильнострумовому розрядному колі модернізованого потужного ГСБ типу УИТОМ-1 імпульсної  $A$ - компоненти струму штучної блискавки з нормованими АЧП ( $I_{mA1} \approx 211,9$  кА;  $t_{mA1} \approx 32$  мкс;  $\tau_{p1A} \approx 500$  мкс;  $J_{aA} \approx 2,1 \cdot 10^6$  Дж/Ом) [16]

З експериментальних даних рис. 19 витікає те, що розроблена і створена без урахування діючих вимог щодо блискавкозахисту дослідна модель приймально-передавальної антени вітчизняної авіаційної техніки випробувань на блискавкостійкість за вимогами нормативних документів США [12-14] не витримує. При цьому від вказаної ударної дії потужної імпульсної  $A$ - компоненти струму штучної блискавки вона була зруйнована і виведена з ладу (див. рис. 19, б).

На рис. 20, а, б наведені результати випробування ВЗ панелі обшивки паливного баку літака конструкції «Ан» з кришкою люка-лазу з алюмінієвого сплаву Д16 на блискавкостійкість (на іскріння у його середині від удару в ЛА блискавки) для зони 1А при прямій дії на цей ВЗ за допомогою мідного ЕВД від генераторів імпульсних струмів (ГІС-А, ГІС-В і ГІС-С\*) потужного модернізованого високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 необхідних  $A$ -,  $B$ - і  $C^*$ - компонент імпульс-



ного струму штучної блискавки з нормованими АЧП ( $U_{c1} \approx 30$  кВ;  $U_{c2} \approx 4$  кВ) у відповідні точки безпосередньо її дюралюмінієвої кришки люка-лазу.

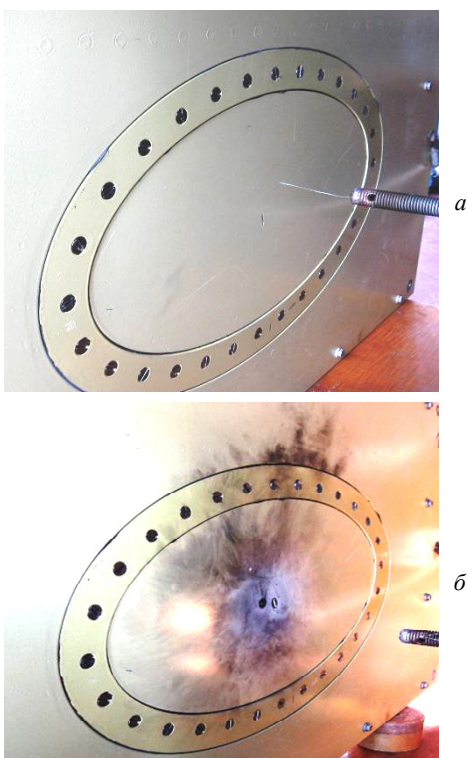


Рис. 20. Зовнішній вигляд В3 панелі вітчизняного ЛА з кришкою люка-лазу і кільцем паливного бака з алюмінієвого сплаву Д16 з ребрами жорсткості та різними варіантами їх металізації до (а) і після (б) прямої сумісної дії на нього в розрядному колі модернізованого потужного високовольтного ГСБ типу УИТОМ-1 нормованих А- ( $I_{mA1} \approx 196$  кА;  $t_{mA1} \approx 42$  мкс;  $\tau_{p1A} \approx 500$  мкс;  $J_{AA} \approx 2,13 \cdot 10^6$  Дж/Ом), В- ( $I_{mB} \approx 7,32$  кА;  $I_{CB} \approx 2431$  А;  $q_{LB} \approx 12,4$  Кл;  $\tau_{p1B} \approx 5,1$  мс) і С\*- ( $I_{mC^*} \approx 1032$  А;  $\tau_{p1C^*} \approx 15$  мс;  $q_{LC^*} \approx 7,2$  Кл;  $I_{CC^*} \approx q_{LC^*} / \tau_{p1C^*} \approx 480$  А) компонент повного імпульсного струму штучної блискавки (зона ураження ЛА в атмосферному повітрі грозивим розрядом 1А)

Отримані згідно рис. 20 дослідні дані вказують на те, що для зони ураження 1А дія А-, В- і С\*- компонент струму блискавки з нормованими АЧП на В3 панелі обшивки паливного баку ЛА з алюмінієвого сплаву Д16 з кришкою люка-лазу приводить до проникнення відповідних електророзрядних продуктів (чорної сажі по периметру герметизації кришки цього люка-лазу і зафіксованих нами фотокамерою іскор) від прямої дії імітованих у лабораторних умовах грозивих розрядів в зону його внутрішньої поверхні, що може приводити до вибуху пари в паливному баку ЛА і його катастрофі.

З отриманих на відкритому повітрі в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії дослідних даних (див. рис. 15-20), не дивлячись на їх фрагментарність, слідує висновок про те, що металеві (композиційні) елементи конструкції літаків і приймально-передавальні радіотехнічні пристрої ЛА перед їх виготовленням та впровадженням в практику необхідно перевіряти в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії на електромагнітну сумісність і стійкість до прямої дії на них відповідних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки (див. табл. 1).

**Висновки.** На даний час НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» має у своєму розпорядженні діючий потужний модернізований високовольтний ГСБ типу УИТОМ-1 з удосконаленими високовольтними сильноточовими вимірювальними засобами, що входять до його складу, які здатні в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії надійно генерувати і вимірювати основні компоненти повного імпульсного струму штучної блискавки, що діють на відкритому повітрі та випробовувати на блискавкостійкість різні бортові пристрої (системи) об'єктів авіаційної і ракетно-космічної техніки. Показано, що в сильноточовому розрядному колі вказаного потужного високовольтного ГСБ імітуються імпульсна А- (повторна імпульсна D-), проміжна В- і тривала С- (укорочена тривала С\*-) компоненти повного імпульсного струму штучної блискавки, АЧП яких задовольняють жорстким технічним вимогам нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5414: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Натурні електромагнітні випробування авіаційної і ракетно-космічної техніки, що розробляються і модернізуються, на стійкість до прямої дії на її основні бортові пристрої (системи) і конструкційні елементи з металевими і композиційними матеріалами вказаних основних компонент повного імпульсного струму штучної блискавки, сприятимуть підвищенню живучості ЛА в умовах їх польоту і перебування в електрично активній земній атмосфері з потужними грозивими імпульсними іскровими розрядами.

**Фінансування.** Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (тема ДБ № 0123U101704).

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 12, pp. 1548-1565. doi: <https://doi.org/10.1109/5.16349>.
2. Uman M.A., Rakov V.A. A critical review of nonconventional approaches to lightning protection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, no. 12, pp. 1809-1820. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-12-1809>.
3. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. Харьков: НТМТ, 2010. 292 с.
4. MIL-STD-464A. Department of Defense Interface Standard: Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems. 19 December 2002, 162 p.
5. Юман М.А. Молния / Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 327 с.
6. DO-160G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. USA, 2011. 438 p.
7. AECTP-500. NATO Standard Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1. Brussels, NSO Publ., 2016. 1125 p.
8. IEC 62305-1: 2010. Protection against Lightning. Part 1: General Principles. Geneva, IEC Publ., 2010. 72 p.
9. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering complex Scientific-&Research Planning-&Design Institute «Molnija» of NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and electromagnetic compatibility. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 37-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.
10. Piantini A., Janszowski J.M. The influence of the upward leader on lightning induced voltages. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1996, vol. 1, pp. 352-357.

11. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 4, pp. 1543-1555. doi: <https://doi.org/10.1109/61.714865>.

12. SAE ARP 5412: 2013. *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*. SAE Aerospace. USA, 2013. 56 p.

13. SAE ARP 5414: 2013. *Aircraft Lightning Zoning*. SAE Aerospace. USA, 2013, 33 p.

14. SAE ARP 5416: 2013. *Aircraft Lightning Test Methods*. SAE Aerospace. USA, 2013, 145 p.

15. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 401-405. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441208030123>.

16. Баранов М.І. *Вибрані питання електрофізики: Монографія у 4 томах. Том 4: Ефекти взаємодії фізичних тіл з полями і струмами*. Харків: ФОП Панов А.М., 2023. 552 с.

17. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Hrytsenko A.S., Kostyuk V.A. Results of investigations of thermal resistibility of prototypes of aluminum alloy panels of fuel tank of airplane to direct action of normalized components of artificial lightning current. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 29-38. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.04>.

18. Кухлинг Х. *Справочник по физике* / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1982. 520 с.

19. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. *Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник* / Под ред. проф. Г.С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 656 с.

20. Кнопфель Г. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. 391 с.

21. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей*. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.

22. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*, 2010, № 5, С. 69-74.

23. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов. *Электротехника и электромеханика*, 2015, № 6, С. 47-52. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.08>.

24. Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО-60. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка і електрофізика високих напруг*, 2007, № 20, С. 45-56.

25. Шваб А. *Измерения на высоком напряжении* / Пер. с нем. М.: Энергия, 1973. 233 с.

26. Кужекин И.П. *Испытательные установки и измерения на высоком напряжении*. М.: Энергия, 1980. 136 с.

27. Wada A., Horii K. Measurement of Lightning Current by Magnetizing Effect of Magnetic Tape. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 1991, vol. 111, no. 1, pp. 45-50. doi: <https://doi.org/10.1541/ieejpes1990.111.1.45>.

28. Hussein A.M., Janischewskij W., Chang J.-S., Shostak V., Chisholm W.A., Dzurevych P., Kawasaki Z.-I. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, vol. 100, no. D5, pp. 8853-8861. doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00543>.

29. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The Coaxial Shunt for Measurement of Current Pulses of Artificial Lightning with the Amplitude up to  $\pm 220$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 501-505. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441218030156>.

30. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage)

age) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 44-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.08>.

## REFERENCES

1. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 12, pp. 1548-1565. doi: <https://doi.org/10.1109/5.16349>.
2. Uman M.A., Rakov V.A. A critical review of nonconventional approaches to lightning protection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, no. 12, pp. 1809-1820. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-12-1809>.
3. Kravchenko V.I. *Lightning. Electromagnetic factors and their damaging effects on technical equipment*. Kharkiv, NTMT Publ., 2010. 292 p. (Rus).
4. MIL-STD-464A. *Department of Defense Interface Standard: Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems*. 19 December 2002, 162 p.
5. Uman M.A. *Lightning*. Moscow, Mir Publ., 1972. 327 p. (Rus).
6. DO-160G. *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*. USA, 2011. 438 p.
7. AECTP-500. *NATO Standard Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1*. Brussels, NSO Publ., 2016. 1125 p.
8. IEC 62305-1: 2010. *Protection against Lightning. Part 1: General Principles*. Geneva, IEC Publ., 2010. 72 p.
9. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering complex Scientific-&Research Planning-&Design Institute «Molnija» of NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and electromagnetic compatibility. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 37-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.
10. Piantini A., Janiszewski J.M. The influence of the upward leader on lightning induced voltages. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1996, vol. 1, pp. 352-357.
11. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 4, pp. 1543-1555. doi: <https://doi.org/10.1109/61.714865>.
12. SAE ARP 5412: 2013. *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*. SAE Aerospace. USA, 2013. 56 p.
13. SAE ARP 5414: 2013. *Aircraft Lightning Zoning*. SAE Aerospace. USA, 2013, 33 p.
14. SAE ARP 5416: 2013. *Aircraft Lightning Test Methods*. SAE Aerospace. USA, 2013, 145 p.
15. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 401-405. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441208030123>.
16. Baranov M.I. *Selected topics of Electrophysics. Monograph in 4 vols. Vol. 4. Effects of interaction of physical bodies with fields and currents*. Kharkiv, FOP Panov A.N. Publ., 2023. 552 p. (Ukr).
17. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Hrytsenko A.S., Kostyuk V.A. Results of investigations of thermal resistibility of prototypes of aluminum alloy panels of fuel tank of airplane to direct action of normalized components of artificial lightning current. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 29-38. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.04>.
18. Kuhlning H. *Handbook of Physics*. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
19. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskiy M.N., Ermuratskiy V.V., Kuchinskiy G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Sмирнов B.K., Stepina K.I. *The Electrical capacitors and capacitor units. Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 656 p. (Rus).
20. Knopfel' G. *Ultra strong pulsed magnetic fields*. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
21. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolayevskaya N.N., Shкуропат P.I., Shneerson G.A. *The tech-*

nique of large pulsed currents and magnetic fields. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).

22. Vovchenko A.I., Bohuslavsky L.Z., Myroshnychenko L.N. Trends in development of high-powered high-voltage pulse current generators in the Institute of Pulse Processes and Technology of Ukraine (review). *Technical electrodynamics*, 2010, no. 5, pp. 69-74. (Rus).

23. Baranov M.I., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 6, pp. 47-52. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.08>.

24. Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Limit characteristics of the scattered pulse power and high-power ceramic resistors bulk type TVO-60. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2007, no. 20, pp. 45-56. (Rus).

25. Shwab A. *High voltage measurements*. Moscow, Energy Publ., 1973. 233 p. (Rus).

26. Kuzhekin I.P. *Test facilities and measurements on high voltage*. Moscow, Energy Publ., 1980. 136 p. (Rus).

27. Wada A., Horii K. Measurement of Lightning Current by Magnetizing Effect of Magnetic Tape. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 1991, vol. 111, no. 1, pp. 45-50. doi: <https://doi.org/10.1541/ieejpes1990.111.1.45>.

28. Hussein A.M., Janischewskyj W., Chang J.-S., Shostak V., Chisholm W.A., Dzurevych P., Kawasaki Z.-I. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, vol. 100, no. D5, pp. 8853-8861. doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00543>.

29. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The Coaxial Shunt for Measurement of Current Pulses of Artificial Lightning with the Amplitude up to  $\pm 220$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 501-505. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441218030156>.

30. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 44-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.08>.

Надійшла (Received) 16.11.2023

Прийнята (Accepted) 08.01.2024

Опублікована (Published) 01.05.2024

Баранов Михайло Іванович<sup>1</sup>, д.т.н., гол.н.с.,

Буряковський Сергій Геннадійович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

<sup>1</sup> Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут

«Молнія» Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»,

61013, Харків, вул. Шевченка, 47,

e-mail: baranovmi49@gmail.com (Corresponding Author);

sergbyr@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.G. Buriakovskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Design Institute «Molniya»

of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**Electrical engineering equipment for generating and measuring of complete pulse current of artificial lightning in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory.**

*How to cite this article:*

Baranov M.I., Buriakovskiy S.G. Electrical engineering equipment for generating and measuring of complete pulse current of artificial lightning in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 3, pp. 55-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.08>

**Goal.** Decision of problem scientific and technical task on the reliable generating and measuring in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory basic component of complete pulse current of artificial lightning with the rationed amplitude-temporal parameters (ATPs) with the use of the modernized generator of current of lightning of type of UITOM-1. **Methodology.** Bases of the applied electrical engineering, electrodynamics and electrophysics, electrophysics bases of technique of high-voltage and high pulse currents, bases of high-voltage pulse technique and measuring technique. **Results.** Information, which specify on a decision at Research and Design Institute «Molniya» of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» problem scientific and technical task, related to the reliable generating and measuring in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory of complete pulse current of artificial lightning, which contains pulse A- (repeated pulse D-), intermediate B- and long-term C- (shortened long C\*) components of this current, is resulted, ATPs which answer the hard technical requirements of normative documents of the USA of SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5414: 2013 and SAE ARP 5416: 2013. Short information is indicated about the applied electrical circuits of separate high-voltage generators of pulse currents of condenser type of GIC-A (GIC-D), GIC-B and GIC-C (GIC-C\*), which it is worked as synchronous appearance on the general electrical loading in composition the modernized powerful high voltage generator of complete pulse e current of artificial lightning of type of UITOM-1, and in-use high-voltage measuring facilities which contain the heavy-current low-resistance shunts of type of SHK-300 for simultaneous registration with their help on examinee on stability to lightning devices objects of aviation and space-rocket technique of ATPs proper component of complete i pulse current of artificial lightning. Technical examples are resulted and the row of results of practical application of the indicated domestic powerful high-voltage proof-of-concept electrophysics equipment is described at the tests of elements of some aircrafts (ACs) on resistibility to the direct action on them of complete pulse current of artificial lightning with rationed ATPs. **Originality.** A problem is formulated and having the important applied value in area of aviation and space-rocket technique for the leading countries of the world scientific and technical task on the reliable generating and measuring in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory indicated component of complete pulse current of artificial lightning with rationed ATPs and concrete electro-technological ways and hardware are indicated for its successful decision. **Practical value.** The use of the modernized powerful high-voltage generator of complete pulse current of artificial lightning of type of UITOM-1 developed in practice and created in Ukraine will allow to conduct the real verification on resistibility to the action of lightning of different side systems, devices and construction elements, containing metallic and composition materials, both again developed and modernized ACs, that will be instrumental in the increase of vitality of such ACs in the extreme terms of their flight and stay in an electrical active earthly atmosphere with flowing in it storm electrical discharges. References 30, tables 3, figures 20.

**Key words:** pulse current of artificial lightning, modernized high-voltage generator of current of lightning, shunt, generating, measuring, components of current of lightning.