

Ю.С.НЕМЧЕНКО, гол. метролог, НТУ «ХП»;

В.В.КНЯЗЄВ, канд. техн. наук, пров. наук.співр., НТУ «ХП»;

І.П.ЛІСНОЙ, зав. лаб., НТУ «ХП»;

В.І.КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, директор, НТУ «ХП»

ЗАСТОСУВАННЯ ЕТАЛОНУ-СН ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ІМПУЛЬСНИХ НАПРУГ

Описана методика використання Еталону великих імпульсних напруг (Еталон-СН) для визначення перехідних характеристик засобів вимірювання високих імпульсних напруг. Методику було впробувано на дільниках напруги різних типів з амплітудою від 6 кВ до 300 кВ.

The method of the using the Standard of the high voltage pulses (Etalon-CV) for determination of the transient characteristics of the measuring instruments of the high voltage pulses is described. The voltage dividers of the different types with amplitude from 6 kV till 300 kV were investigated.

Раніше [1, 2] у діючому Еталоні імпульсного електромагнітного поля (Еталоні РЕМП) були експериментально визначені амплітудно-часові параметри імпульсів напруги між електродами смужкової лінії СЛ-48 (далі – СЛ-48) і встановлена теоретична й експериментальна залежність між величиною зарядної напруги на конденсаторі C_{Φ} Еталону й величиною імпульсної напруги в СЛ-48. Ці розрахунки й вимірювання показали, що величини цих обох напруг збігаються і тому Еталон РЕМП можливо використовувати у якості Еталону високих імпульсних напруг (Еталон-СН). Основні метрологічні характеристики Еталону-СН відносно імпульсної напруги наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - АВП вихідних напруг Еталону-СН

Найменування характеристики	Розмірність	Значення
1 Амплітудний діапазон	кВ	від 1 до $5 \cdot 10^3$
2 Тривалість фронту	с	від $8 \cdot 10^{-9}$ до $40 \cdot 10^{-9}$
3 Тривалість імпульсу	с	$1,27 \cdot 10^{-4}$

Вимірювання імпульсів напруги в Еталоні-СН між електродами СЛ здійснюється щупом високовольним Tektronix P6015A, який виробляється промислово, а контроль за формою імпульсу напруги здійснюється штатним метрологічно атестованим вимірювачем напруженості електричного поля СПЕФВ-ЕК. Осцилограми обох імпульсів, які одночасно виміряні за допомогою осцилографа Tektronix DPO 4104, наведено на рис. 1, із якого видно, що форми фронтової частини обох імпульсів напруги подібні, що говорить про правильний вибір методу й засобів вимірювання в Еталоні-СН.

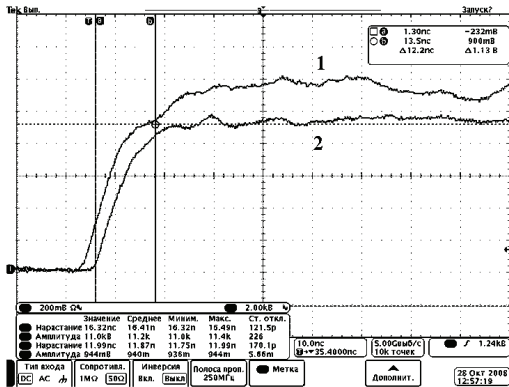


Рисунок 1 – Осцилограми фронту імпульсу напруги з виходу шупа високовольтного P6015A (1) і фронту імпульсу напруги з виходу вимірювача СПЕФВ-ЕК (2) при $U_{зар} = 10$ кВ

Для експериментальних досліджень метрологічних характеристик засобів вимірювання високих імпульсних напруг були обрані п'ять типів дільників напруги (ДН), чотири з яких були створені в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для високовольтних імпульсних установок різного призначення, та один – шуп високовольтний Tektronix P6015A. Їх зовнішній вигляд наведено на рис. 2–6, а основні технічні характеристики, які вказано у формулярах, – у табл. 2.

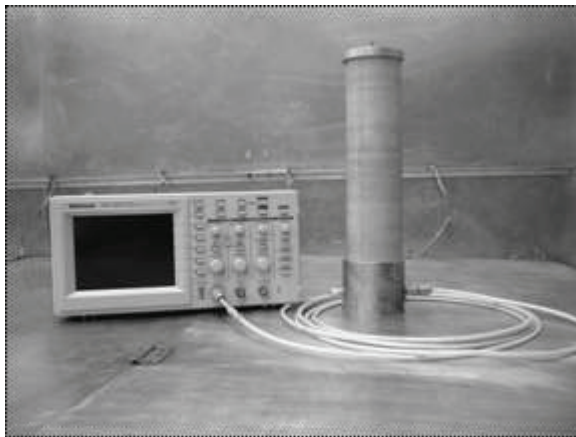


Рисунок 2 – Загальний вид омичного дільника імпульсів високої напруги ОДН-6

Дослідження метрологічних характеристик усіх типів ДН проводилося по черзі згідно зі схемою на рис. 7 та розміщенням ДН на рис. 8 (ДН підключався паралельно електродам СЛ-48 Еталону-СН). Для контролю форми імпульсів у Еталоні-СН було застосовано штатний вимірювач напруженості

електричного поля СПЕФВ-ЕО з волоконно-оптичною лінією зв'язку, який при експериментах установлювався у робочому об'ємі СЛ-48 і який, в порівнянні з СПЕФВ-ЕК, має значно більший часовий діапазон – рис. 9.



Рисунок 3 – Загальний вигляд змішаного дільника імпульсів високої напруги СДН-10



Рисунок 4 – Загальний вид омичного дільника імпульсів високої напруги ОДН-20



Рисунок 5 – Загальний вигляд омичного дільника імпульсів високої напруги ОДН-300



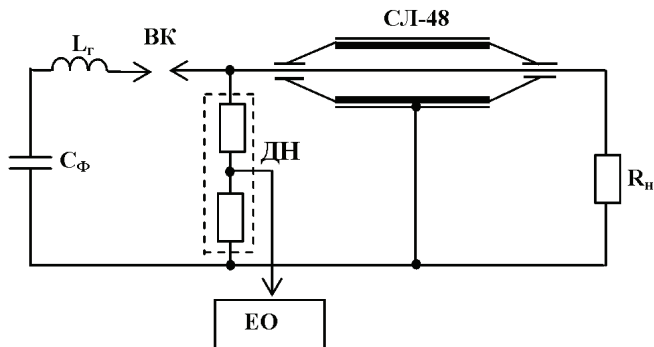
Рисунок 6 – Загальний вигляд змішаного дільника імпульсів високої напруги Tektronix P6015A

Таблиця 2

Параметр	Розмірність	Тип ДН				
		ОДН-6	СДН-10	ОДН-20	ОДН-300	P6015A
1. Амплітудний діапазон	кВ	0,1 - 6	0,1 - 10	1 - 20	10 - 30	0,1 - 40
2. Час наростання перехідної характеристики	нс	27	6	36	100	5
3. Коефіцієнт ділення	-	198	1040	1200	10000	1000
4. Габаритні розміри (висота x діаметр)	мм	320 x 80	280 x 80	760 x 260	2200 x 270	340 x 100

Згідно з даними табл. 1 та 2 імпульс напруги між електродами СЛ-48 значно крутіший, ніж час зростання перехідної характеристики (ПХ) ДН, тому у різних ДН буде різна форма ПХ і на ній, зокрема, виникають різного роду коливання. Для встановлення галузі застосування ДН були проведені роботи по демпфуванню цих коливань, що і наведено у послідоючих осцилограмах.

Результати вимірювання форми та амплітудно-часових параметрів ПХ усіх ДН наведено нижче.



C_{Φ} – розрядна ємність Еталону-ТН; L_r – сумарна індуктивність розрядного контуру;
 ВК – високовольний комутатор; СЛ-48 – смужкова лінія; R_n – узгоджувальний резистор СЛ; ДН – дільник напруги, що досліджується; ЕО – осцилограф Tektronix DPO 4104

Рисунок 7 – Схема вимірювання ПХ ДН



Рисунок 8 – Ввімкнення щупа високовольного P6015A між електродами СЛ-48

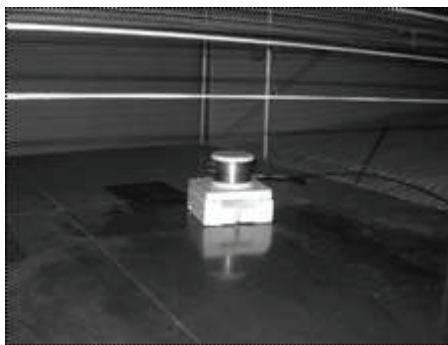


Рисунок 9 – Установка вимірювального перетворювача СПЕФВ-ЕО між електродами СЛ-48 (фотоприймач вимірювача й осцилограф розташовано у вимірювальній кабіні)

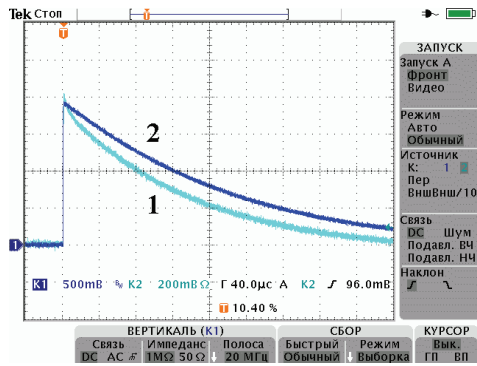


Рисунок 10 – Осцилограмми спадної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48

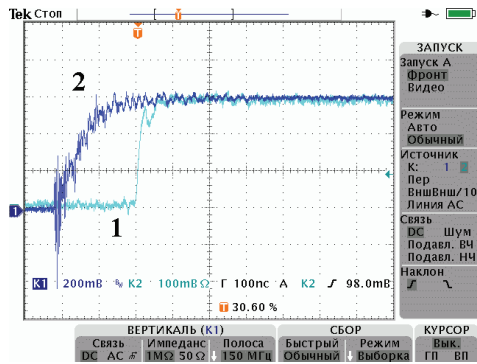


Рисунок 11 – Осцилограмми фронтової частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 0$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 150 МГц

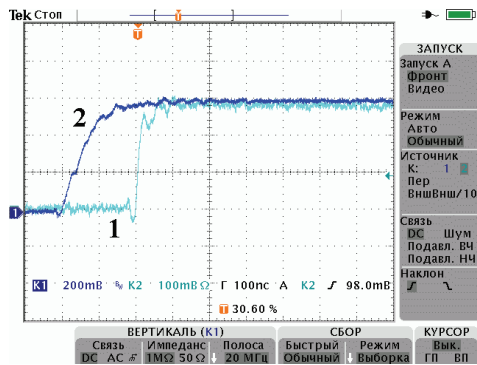


Рисунок 12 – Осцилограмми фронтової частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 6,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 20 МГц

Результати експериментального визначення форми й параметрів ПХ омичного дільника напруги ОДН-300. Осцилограми вимірювання імпульсів високої напруги між електродами СЛ-48 за допомогою омичного дільника напруги ОДН-300 і вимірювача напруженості електричного поля СПЕФВ-ЕО наведено на рисунках 10 - 14 (на всіх осцилограмах крива 1 - напруга з виходу СПЕФВ-ЕО, а крива 2 - напруга з виходу ОДН-300).

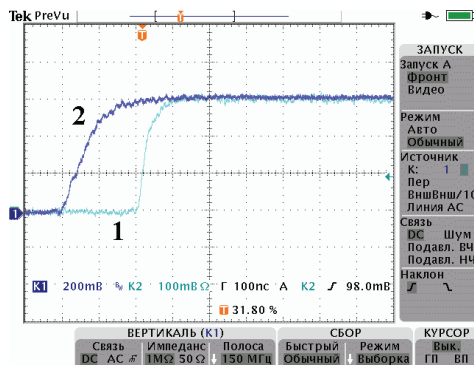


Рисунок 13 – Осцилограми фронтової частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольному комутаторі $p = 0$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ, смузі пропускання осцилографа 150 МГц і ввімкнені на виході ОДН-300 інтегруючого ланцюжка

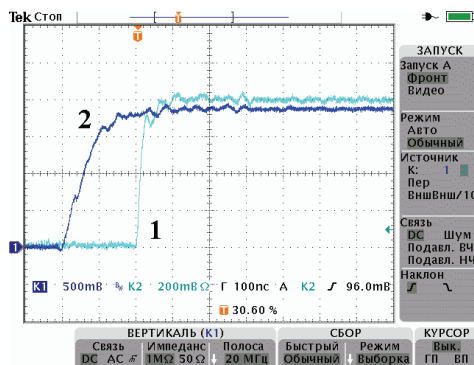


Рисунок 14 – Осцилограми фронтової частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольному комутаторі $p = 6,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 20$ кВ і смузі пропускання осцилографа 20 МГц

Висновки по ОДН-300:

1. Спад імпульсу напруги з виходу ОДН-300 більш довгий, ніж з виходу СПЕФВ-ЕО, що пояснюється недостатньою для вимірюваного імпульсу постійною інтегрування СПЕФВ-ЕО.
2. Фронтна частина напруги з виходу СПЕФВ-ЕО значно крутіша, ніж

фронтна частина напруги з виходу ОДН-300, що пояснюється тим, що вимірювач СПЕФВ-ЕО передає цей фрагмент імпульсу напруги (напруженості електричного поля) без спотворення, а час наростання перехідної характеристики ОДН-300 значно більше тривалості фронту вимірюваного імпульсу через його більші габарити.

3. При смузі пропускання осцилографа 150 МГц на осцилограмі фронтної частини імпульсу напруги з виходу ОДН-300 видно високочастотні «шуми» (рис. 11), викликані недостатньою заводо захищеністю вимірювального кабелю. Ці «шуми» можна усунути з осцилограми двома способами: або зниженням смузі пропускання до 20 МГц без зміни основної осцилограми імпульсу напруги з виходу ОДН-300 (рис. 12, 14), або ввімкненням на виході ОДН-300 інтегруючого ланцюжка (рис. 13).

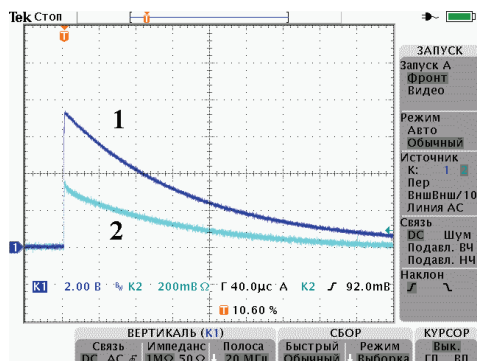


Рисунок 15 – Осцилограми спадної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48

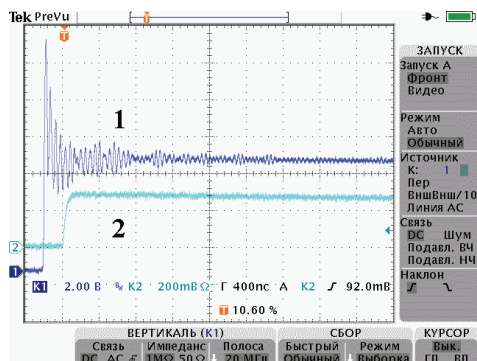


Рисунок 16 – Осцилограми фронтної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 2,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 20 МГц

Результати експериментального визначення форми й параметрів ПХ омичного дільника напруги ОДН-20. Осцилограми вимірювання імпульсів високої напруги між електродами СЛ-48 за допомогою омичного дільника напруги ОДН-20 і вимірювача напруженості електричного поля СПЕФВ-ЕО наведені на рис. 15 - 19 (на всіх осцилограмах крива 1 – напруга з виходу ОДН-20, а крива 2 – напруга з виходу СПЕФВ-ЕО).

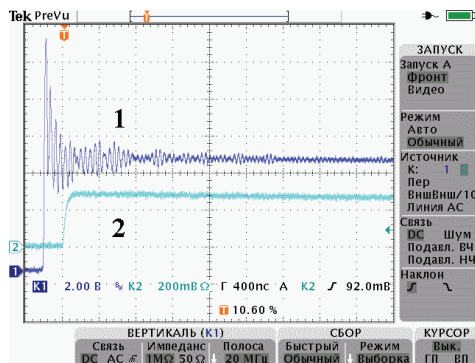


Рисунок 17 – Осцилограми фронтної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 2,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ, смузі пропускання осцилографа 20 МГц і ввімкнені на виході ОДН-20 інтегруючого ланцюжка з недостатньою постійною інтегрування

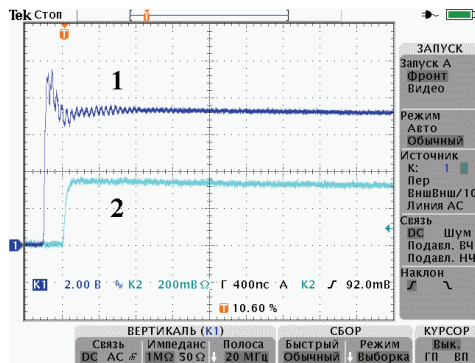


Рисунок 18 – Осцилограми фронтної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 2,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ, смузі пропускання осцилографа 20 МГц і ввімкнені на виході ОДН-20 інтегруючого ланцюжка з достатньою постійною інтегрування

Висновки по ОДН-20:

1. Спад імпульсу напруги з виходу ОДН-20 більш довгий, ніж з виходу СПЕФВ-ЕО, що пояснюється недостатньою для вимірюваного імпульсу постійною інтегрування СПЕФВ-ЕО.

- Фронтна частина напруги з виходу ОДН-20, тобто перехідна характеристика ОДН-20 містить накладені на фронт високочастотні коливання, викликані конструктивними недоліками дільника напруги у цій часовій області. Виходячи із цього ОДН-20 не придатний для вимірювання наносекундних імпульсів напруги, тому що через накладені коливання не можна метрологічно точно визначити параметри ПХ.
- Ввімкнення на виході ОДН-20 інтегруючого RC-ланцюжка з достатньою постійною інтегрування дозволяє прибрати накладені коливання із фронту ПХ ОДН-20, але при цьому значно збільшується тривалість фронту ПХ (до декількох сотень наносекунд), що автоматично визначає область застосування ОДН-20 – вимірювання імпульсів напруги з мікросекундними фронтами.

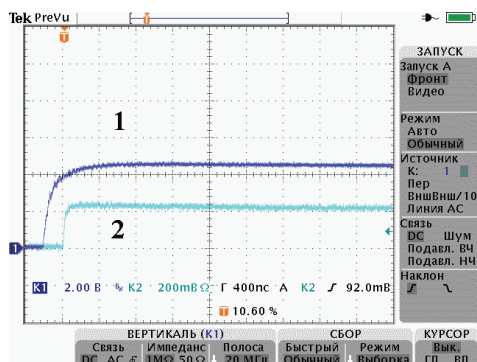


Рисунок 19 – Осцилограми фронтної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 2,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 20$ кВ, смузі пропускання осцилографа 20 МГц і ввімкненні на виході ОДН-20 інтегруючого ланцюжка з зайвою постійною інтегрування

Результати експериментального визначення форми й параметрів ПХ омичного дільника напруги ОДН-6. Осцилограми вимірювання імпульсів високої напруги між електродами СЛ-48 за допомогою омичного дільника напруги ОДН-6 і щупа високовольтного Р6015А наведені на рис. 20 - 21 (на всіх осцилограмах крива 1 – напруга з виходу Р6015А, а крива 2 – напруга з виходу ОДН-6).

Висновки по ОДН-6:

- Спади імпульсів напруги з виходів ОДН-6 і Р6015А однакові, що пояснюється тим, що обидва дільники є омичними дільниками напруги й однаково вірогідно передають спад імпульсів мікросекундної тривалості.
- Фронтна частина напруги з виходу Р6015А більш крута, ніж фронт

това частина напруги з виходу ОДН-6, що пояснюється тим, що вимірювач ОДН-6 має більш пологі переходну характеристику (приблизно 30 нс) і тим самим може застосовуватися тільки для вимірювання імпульсів із тривалістю фронту не менш 100 нс.

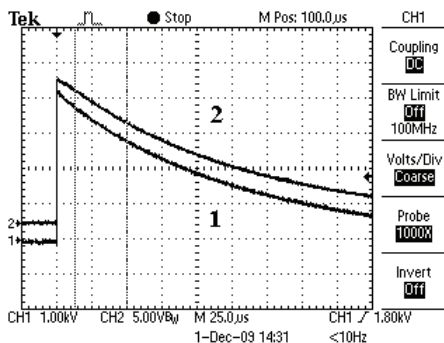


Рисунок 20 – Осцилограми спадної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48

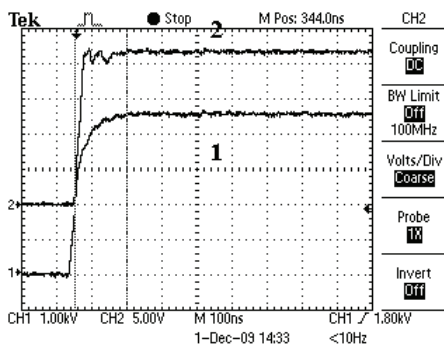


Рисунок 21 – Осцилограми фронтової частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 2,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 100 МГц

Результати експериментального визначення форми й параметрів ПХ омичного дільника напруги СДН-10. Осцилограми вимірювання імпульсів високої напруги між електродами СЛ-48 за допомогою змішаного дільника напруги СДН-10 і щупа високовольтного Р6015А наведені на рис. 22 - 26 (на всіх осцилограмах крива 1 – напруга з виходу Р6015А, а крива 2 – напруга з виходу СДН-10).

Висновки по СДН-10:

1. Спад імпульсу напруги з виходу СДН-10 (рис. 22) більш довгий, ніж з виходу Р6015А, що пояснюється недостатнім проробленням узгодження ємнісного та омичного ланцюжків дільника СДН-10 у мікросекундному діапазоні.

- При тиску азоту у високовольтному комутаторі $p = 0$ (тривалість фронту імпульсу напруги при цьому порядку 40 нс) фронтові частини імпульсів напруги з виходів Р6015А і СДН-10 однакові, що говорить про те, що ємнісний та омичний ланцюжки дільника СДН-10 узгоджені у наносекундному діапазоні.
- При збільшенні тиску азоту у високовольтному комутаторі до $p = 6,5$ атм. (тривалість фронту імпульсу напруги при цьому знижується до 10 нс) на фронтівій частині напруги з виходу СДН-10 з'являються дуже високочастотні коливання, викликані ударним порушенням коливального контуру, що складається з ємностей СДН-10 і конструктивних паразитних індуктивностей. Для усунення цих паразитних коливань і одержання ПХ із гладко наростаючим експоненціальним фронтом на виході СДН-10 необхідно включати інтегруючий ланцюжок (рис. 25 і 26), але при цьому час наростання ПХ збільшується до 100 нс і його можна застосовувати для вимірювання імпульсів напруги із тривалістю фронту більше 300 нс.

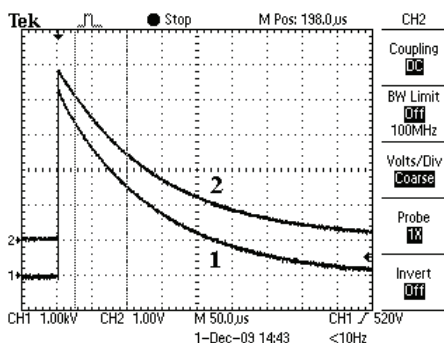


Рисунок 22 – Осцилограми спадної частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48

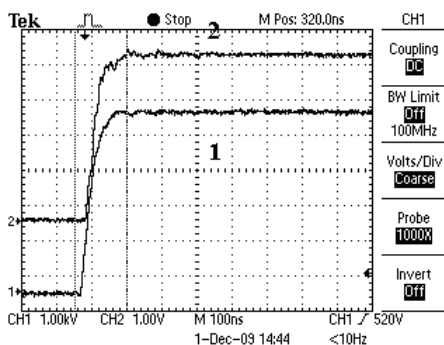


Рисунок 23 – Осцилограми фронтівій частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 0$ атм., зарядній напругі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 100 МГц

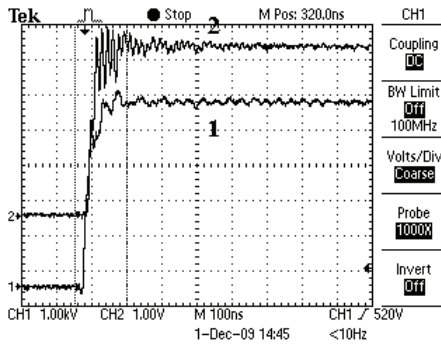


Рисунок 24 – Осцилограми фронтвої частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 6,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ і смузі пропускання осцилографа 100 МГц

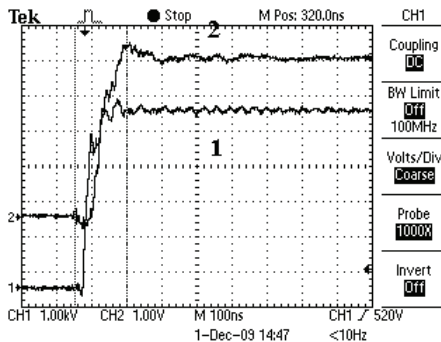


Рисунок 25 – Осцилограми фронтвої частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 6,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ, смузі пропускання осцилографа 100 МГц і ввімкнені на виході СДН-10 інтегруючого ланцюжка з недостатньою постійною інтегрування

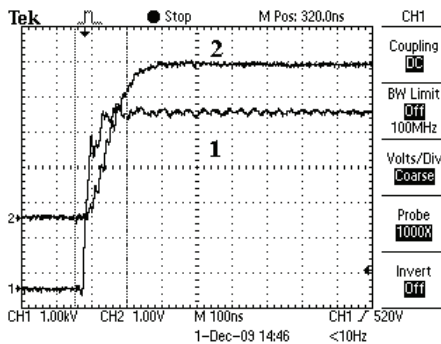


Рисунок 26 – Осцилограми фронтвої частини імпульсу напруги між електродами СЛ-48 при тиску у високовольтному комутаторі $p = 6,5$ атм., зарядній напрузі Еталону-СН $U = 5$ кВ, смузі пропускання осцилографа 100 МГц і ввімкнені на виході СДН-10 інтегруючого ланцюжка з достатньою постійною інтегрування

Висновки по СДН-10:

1. Спад імпульсу напруги з виходу СДН-10 (рис. 22) більш довгий, ніж з виходу Р6015А, що пояснюється недостатнім проробленням узгодження ємнісного та омичного ланцюжків дільника СДН-10 у мікросекундному діапазоні.
2. При тиску азоту у високовольтному комутаторі $p = 0$ (тривалість фронту імпульсу напруги при цьому порядку 40 нс) фронтові частини імпульсів напруги з виходів Р6015А і СДН-10 однакові, що говорить про те, що ємнісний та омичний ланцюжки дільника СДН-10 узгоджені у наносекундному діапазоні.
3. При збільшенні тиску азоту у високовольтному комутаторі до $p = 6,5$ атм. (тривалість фронту імпульсу напруги при цьому знижується до 10 нс) на фронтівій частині напруги з виходу СДН-10 з'являються дуже високочастотні коливання, викликані ударним порушенням коливального контуру, що складається з ємностей СДН-10 і конструктивних паразитних індуктивностей. Для усунення цих паразитних коливань і одержання ПХ із гладко наростаючим експоненціальним фронтом на виході СДН-10 необхідно включати інтегруючий ланцюжок (рис. 25 і 26), але при цьому час наростання ПХ збільшується до 100 нс і його можна застосовувати для вимірювання імпульсів напруги із тривалістю фронту більше 300 нс.

Резюме.

1. Створений в НДПКІ «Молнія» Еталон високих імпульсних напруг (Еталон-СН) виявився ефективним засобом для визначення реальних ПХ засобів вимірювання високих імпульсних напруг практично усіх видів та класів, про що кажуть наведені вище осцилограми та їх аналіз.
2. За допомогою Еталону-СН шляхом зміни тиску азоту в комутаторі Еталону-СН можна змінювати тривалість фронту його імпульсів від 8 нс (тиск 6,5 атм.) до 40 нс (тиск 0 атм.);
3. За допомогою Еталону-СН стало можливим виявити скриті вади засобів вимірювання високих імпульсних напруг, які неможливо було виявити іншими способами.
4. За допомогою Еталону-СН можливо відкоригувати форму ПХ засобів вимірювання високих імпульсних напруг таким чином, щоб отримати потрібну ПХ і, тим самим, чітко визначити галузь застосування ДН.

Список літератури: 1. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П., Немченко Ю.С. Экспериментальные исследования метрологических характеристик средств измерения высоких импульсных напряжений на Эталоне-ТН // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 39. – С.79-84. 2. Немченко Ю.С., Князев В.В., Лисний И.П.,

Кравченко В.І. Вихідні характеристики Еталону одиниць імпульсної напруги/струму «Еталон-СН» // Матеріали науково-практичної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук-Хургада. – 2009. – С.42-44.

Надійшла до редколегії 29.03.2010