

Д. С. ШКОДА, М. В. КІРІЧЕНКО, Р. В. ЗАЙЦЕВ, К. О. МІНАКОВА, С. Ю. БЛИК

РОЗРОБКА НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ

Останнім часом при розробці накопичувачів енергії багато уваги приділяється електромагнітній стабільності, що надає можливість підтримувати робочі параметри під час впливу електромагнітних імпульсів та наслідків від їх взаємодії. Питання забезпечення електромагнітної стабільності радіоелектронного обладнання, пов'язане з тим, що під впливом електромагнітних імпульсів в електронних та електричних схемах виникають імпульси перенапруги, в залежності від характеру походження електромагнітних імпульсів, відстані від джерела електромагнітних імпульсів до компонентів апаратного комплексу значення амплітуди, час наростання і тривалість імпульсів можуть змінюватися. Саме тому для сучасних досліджень залишається надзвичайно актуальним завдання створення високоенергетичних генераторів електромагнітних імпульсів. Основним напрямком використання таких генераторів є вивчення взаємодії тонкоплівкових шарів напівпровідникових матеріалів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами та розробка елементів захисту радіоелектронного обладнання від впливу електромагнітних імпульсів. Створено набір генераторів електромагнітних імпульсів, застосування яких дозволить вивчити властивості елементів захисту радіоелектронного обладнання в широкому діапазоні потужностей електромагнітних імпульсів. У комплексі з раніше розробленою конструкцією генератора електромагнітних імпульсів це дозволить впливати на досліджувані зразки радіоелектронного обладнання та елементів захисту шляхом комплексної дії електромагнітних імпульсів, які матимуть як високий час, так і велику енергію. Для забезпечення комфортної та безпечної дослідницької роботи пристрій має візуальну індикацію режимів роботи, зокрема режимів генерації високої постійної напруги. Розроблений пристрій керування та джерела живлення для високоенергетичного генератора електромагнітних імпульсів відповідає вимогам, встановленим під час його розробки, і може бути застосований для вивчення особливостей взаємодії напівпровідникових тонкоплівкових шарів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами.

Ключові слова: лінія зарядки, енергія, генератор, мікроконтролер.

Д. С. ШКОДА, М. В. КИРИЧЕНКО, Р. В. ЗАЙЦЕВ, К. А. МИНАКОВА, С. Ю. БЕЛИК

РАЗРАБОТКА НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ

В последнее время при разработке накопителей энергии много внимания уделяется электромагнитной стабильности, что позволяет поддерживать рабочие параметры при воздействии электромагнитных импульсов и последствий от их взаимодействия. Вопрос обеспечения электромагнитной стабильности радиоэлектронного оборудования, связанный с тем, что под влиянием электромагнитных импульсов в электронных и электрических схемах возникают импульсы перенапряжения, в зависимости от характера происхождения электромагнитных импульсов, расстояния от источника электромагнитных импульсов до компонентов аппаратного комплекса, значение амплитуды, время нарастания и длительность импульсов могут изменяться. Именно поэтому для современных исследований остается очень актуальной задача создания высокоэнергетических генераторов электромагнитных импульсов. Основным направлением использования генераторов является изучение взаимодействия тонкопленочных слоев полупроводниковых материалов с высокоэнергетическими электромагнитными импульсами и разработка элементов защиты радиоэлектронного оборудования от воздействия электромагнитных импульсов. Создан набор генераторов электромагнитных импульсов, применение которых позволит изучить свойства элементов защиты радиоэлектронного оборудования в широком диапазоне мощностей электромагнитных импульсов. В комплексе с ранее разработанной конструкцией генератора электромагнитных импульсов это позволит влиять на исследуемые образцы радиоэлектронного оборудования и элементов защиты путем комплексного действия электромагнитных импульсов, которые будут иметь как высокое время, так и большую энергию. Для обеспечения комфортной и безопасной работы устройству имеет визуальную индикацию режимов работы, в частности, режимов генерации высокого постоянного напряжения. Разработанное устройство управления и источники питания для высокоэнергетического генератора электромагнитных импульсов соответствуют требованиям, поставленным при их разработке, и могут быть применены для изучения особенностей взаимодействия полупроводниковых тонкопленочных слоев с высокоэнергетическими электромагнитными импульсами.

Ключевые слова: линия зарядки, энергия, генератор, микроконтроллер.

D. S. SHKODA, M. V. KIRICHENKO, R. V. ZAITSEV, K. A. MINAKOVA, S. YU. BILYK

DEVELOPMENT OF ENERGY STORAGE FOR HIGH VOLTAGE ELECTROMAGNETIC PULSE GENERATOR

Recently, much attention has been paid to electromagnetic stability in the development of energy storage devices, which makes it possible to maintain operating parameters during exposure to electromagnetic pulses and the consequences of their interaction. The issue of ensuring the electromagnetic stability of electronic equipment, due to the fact that under the influence of electromagnetic pulses in electronic and electrical circuits are overvoltage pulses, depending on the origin of electromagnetic pulses, distance from electromagnetic pulses source to hardware components amplitude, rise time and pulse duration can change. That is why the task of creating high-energy electromagnetic pulse generators remains extremely important for modern research. The main use of such generators is to study the interaction of thin-film layers of semiconductor materials with high-energy electromagnetic pulses and the development of elements to protect electronic equipment from the effects of electromagnetic pulses. A set of electromagnetic pulses generators has been created, the use of which will allow studying the properties of the protection elements of electronic equipment in a wide range of electromagnetic pulses capacities. In combination with the previously developed design of the electromagnetic pulses generator, this will affect the studied samples of electronic equipment and protection elements through the integrated operation of the electromagnetic pulses, which will have both high time and high energy. To ensure comfortable and safe research work, the device has a visual indication of operating modes, including modes of high DC voltage generation. The developed control device and power supply for the high-energy electromagnetic pulse generator meets the requirements established during its development and can be used to study the interaction of semiconductor thin-film layers with high-energy electromagnetic pulses.

Keywords: charging line, energy, generator, microcontroller.

© Д. С. Шкода, М. В. Кіріченко, Р. В. Зайцев, К. О. Мінакова, С. Ю. Білик 2021

Вступ. Однією з головних вимог до сучасного радіоелектронного обладнання (РЕО) є висока надійність його функціонування під впливом зовнішніх факторів. В останні роки все більше уваги приділяється електромагнітній стабільності, що означає здатність підтримувати робочі параметри під час і після дії електромагнітних імпульсів (ЕМІ) різного походження [1]. Проблема забезпечення електромагнітної стабільності РЕО пов'язана з тим, що під впливом ЕМІ в електронних та електричних схемах виникають імпульси перенапруги, значення амплітуди U_{imp} , час наростання і тривалість яких можуть змінюватися в широких межах внаслідок характеру походження ЕМІ, відстані від джерела ЕМІ до компонентів апаратного комплексу (антени, лінії зв'язку), а також інших факторів [2]. Для нещодавно розроблених матеріалів з мікро- або наноструктурою та методів їх осадження [3–6] взаємодія з ЕМІ може дозволити досягти багатообіцяючих практичних результатів. Імпульсні перенапруги, спричинені ЕМІ, можуть призвести до серйозного руйнуючого впливу на елементи обладнання (особливо вхідних пристроїв) внаслідок порушення гальванічного зв'язку через плавлення провідників; струми скрізь ділянки підвищеної провідності, катастрофічне збільшення струму витoku конденсаторів та польових діодів із ізольованим затвором під час пробою діелектричного шару. Напівпровідникові прилади особливо чутливі до впливу пошкоджень, спричинених дією ЕМІ. Це пов'язано як з властивостями р-п-переходу, так і з питомою теплопровідністю напівпровідникових матеріалів. Коли напруга зворотного зміщення переходу є достатньою для початку лавинного пробою, у переході може виділятися велика кількість теплової енергії [7, 8]. Тому в локальних районах лавинного пробою внаслідок поступового накопичення тепла температура може досягати значень, що відповідають температурі плавлення напівпровідникового матеріалу, що спричиняє шунтування р-п-переходу. Зі зменшенням розмірів конструкцій напівпровідникових приладів рівень енергії імпульса, достатньої для їх пошкодження зменшується і для інтегральних схем становить від 10^{-3} Дж до 10^{-7} Дж. Для обчислювальних пристроїв, що працюють в реальному часі, навіть короточасні збої внаслідок впливу ЕМІ призводять до повної втрати обчислювальної ефективності.

Розробка схеми приладу. Принципи генерації імпульсних сигналів. Синусоїдальні сигнали характеризуються плавністю. Залежність їх від часу не містить різких стрибків, сигнали легко диференціюються, а їх похідна в будь-якій точці кінцева. Більше того, вони мають безперервними всі похідні, і всі вони мають вигляд гармонічних коливань. Завдяки безперервності та стаціонарності синусоїдальні сигнали, поряд з постійними напругами та струмами, добре підходять для тривалої передачі енергії крізь кабелі або в просторі (у вигляді електромагнітних хвиль).

Однак часто є потреба у передачі великої кількості енергії, що виділяється за короткий час. Яскравим *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика*

прикладом тут є радар. У цьому випадку в простір надходить короткий і потужний імпульс електромагнітного випромінювання, який відбивається від цілі і сприймається радіолокаційним приймачем. Ця затримка відбитого сигналу дозволяє оцінити відстань до цілі, а детальний аналіз відбитого імпульсу часто дозволяє судити про природу цілі. Імпульсні сигнали потрібні в ряді інших застосувань, таких як запуск потужних лазерних діодів, побудова ультразвукових та відеоімпульсних локаторів, запуск ядерних та термоядерних процесів і навіть тестування багатьох електронних пристроїв з використанням імпульсних сигналів або окремих їх властивостей [13–16].

Найпоширенішими є прямокутні імпульси, зокрема симетричні – меандр. Широко використовуються пилкоподібні та трикутні імпульси. Вони використовуються в скануючих генераторах аналогових осцилографів та у функціональних генераторах.

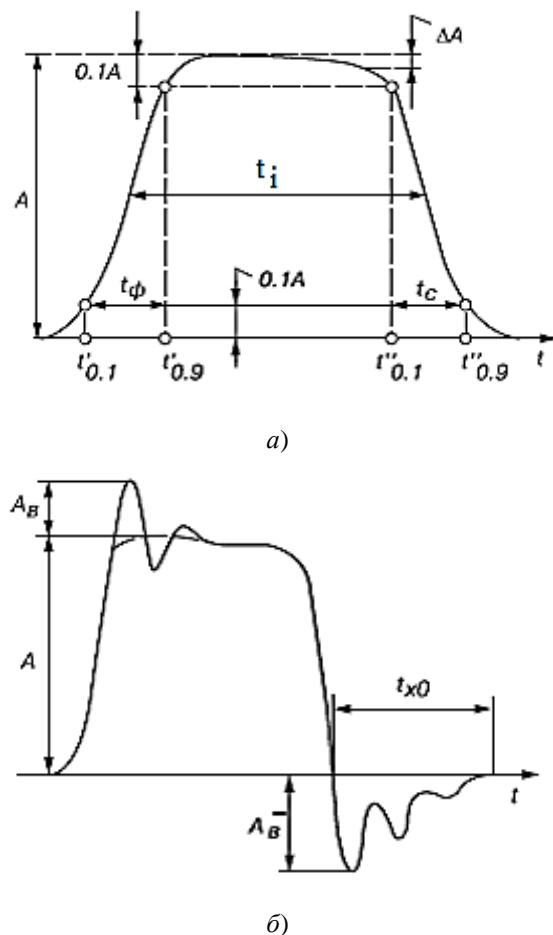


Рисунок 1 – Реальна форма імпульсу без коротких викидів (а) та з такими викидами (б)

Генератори вимірювальних імпульсів повинні виробляти імпульси, максимально наближені до імпульсів ідеальної форми. Однак справжні імпульси, навіть схожі на прямокутні, відрізняються від ідеальних. Так, перепади нескінченно малої тривалості практично не реалізовані, так що фронти реальних прямокутних імпульсів завжди мають кінцеву

тривалість. На рис. 1 а наведено форму реального імпульсу та позначено його основні параметри. Таку форму набувають навіть близькі до ідеальних прямокутні імпульси після проходження через підсилювачі і паразитні електричні ланцюги.

Для реального імпульсу використовуються такі технічні параметри:

- Амплітуда імпульсу A або його висота (за винятком можливих короткочасних викидів).
- Тривалість активного імпульсу, виміряна при $0,5 A$.
- Час наростання імпульсу або тривалість переднього краю, виміряні на рівнях від $0,1$ до $0,9 A$.
- Час спаду або тривалість задньої кромки, виміряні від $0,9$ до $0,1 A$.
- Час затримки – час від нуля до часу, коли рівень сигналу досягає $0,1 A$.
- Рівень спадання вершини ΔA – це відносний рівень спадання майже горизонтальної вершини імпульсу.

Остаточна тривалість фронтів імпульсів обумовлена інерцією активних пристроїв, на яких побудовані генератори імпульсів, та обмеженням смуги частот, посиленою ними зверху. Зменшення вершини відбувається внаслідок розділення RC-ланцюгів та зменшення коефіцієнта підсилення каскадів посилення (при використанні підсилювачів змінного струму). Цього можна уникнути, використовуючи підсилювачі постійного струму, такі як інтегровані диференціальні підсилювачі.

У схемах реальних генераторів імпульсів завжди є паразитні індуктивності та ємності, які часто утворюють паразитні коливальні кола. Збуджені фронтами імпульсів короткої тривалості (частки-одиноці нс), вони часто створюють після них характерні викиди і навіть загасаючі коливання (рис. 1 б). Існує ряд способів їх усунення: ретельний монтаж з максимальним укороченням усіх провідників, використання демпфуючих ланцюгів і феритових кілець з великими втратами і, нарешті, реалізація схем у вигляді смугових ліній, коаксіальних і хвилеводних конструкцій.

Імпульси можуть бути індивідуальними і періодично повторюваними (періодичними). Вони також можуть формуватися в пучках із заданою кількістю імпульсів у пучку. Усі параметри змінного струму також застосовуються до імпульсів. Для періодичних імпульсів особливе значення мають два взаємопов'язані параметри: коефіцієнт заповнення і шпаруватість. Вони визначаються як:

$$K_{DC} = t_i/T < 1; \quad (1)$$

$$Q = 1/K_{DC} = T/t_i > 1. \quad (2)$$

Генератор на зарядній лінії – добре відоме рішення, засноване на використанні довгих ліній в імпульсній техніці наносекундного діапазону. Такі лінії мають три основні властивості:

- наявність тимчасової затримки;
- опір відрізка лінії суто омичний;
- явище відбиття і заломлення імпульсів (хвильові процеси).

Однак у цьому випадку необхідно щоб лінії мали низькі втрати, а неоднорідності в них не мали істотного впливу на передачу сигналу. Тому для формування наносекундних імпульсів перевагу надають високочастотним лініям з розподіленими параметрами (коаксіальні кабелі та смугові лінії), які дозволяють отримувати наносекундні імпульси із шириною спектра аж до гігагерц.

Хвильові процеси в лініях з розподіленими параметрами описуються «телеграфними» рівняннями, що поєднують напругу і струм у лінії. На стиках ліній з перемикачами, навантаженнями тощо, коли порушується однорідність ліній, можуть виникати хвильові відбиття. Можна розрахувати напругу та струм у довільних точках будь-якого генератора, використовуючи поняття коефіцієнтів відбиття і заломлення хвиль, а також закони Кірхгофа та правило Петерсена.

Важливим параметром лінії є час затримки переданого сигналу t_D , який визначається часом поширення електромагнітної хвилі на одиницю довжини. В однорідному кабелі час затримки можна обчислити за формулою:

$$t_D = \sqrt{L_0 \cdot C_0}, \quad (1)$$

де L_0 і C_0 – індуктивність та ємність кабелю на одиницю довжини.

Беручи до уваги, що час поширення хвилі на одиницю довжини обернено пропорційний фазовій швидкості електромагнітної хвилі, можна встановити наступну залежність між часом затримки, імпедансом і параметрами лінії:

$$t_D = \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c}; \quad (4)$$

$$Z = t_D/C_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{C_0 \cdot c}; \quad (5)$$

$$Z = L_0/t_D = \frac{L_0 \cdot c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}; \quad (6)$$

де ε – діелектрична проникність середовища;
 μ – магнітна проникність;
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

Для радіочастотного кабелю $\mu = 1$, а ε – діелектрична проникність ізоляції між внутрішнім і зовнішнім провідниками кабелю. Для поліетиленової ізоляції $t_D = 5$ нс/м

Тривалість прямокутного імпульсу, що генерується на навантаженні, визначається часом двократного проходження струму по довжині кабелю l , і його можна розрахувати за формулою

$$t_i = 2l/v = 2l \frac{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c}. \quad (7)$$

На практиці у реальних схемах не завжди можливо забезпечити суворе дотримання умови координації $R_H = Z_0$. Відхилення від цієї умови впливає на процес формування імпульсу і призводить до спотворення його форми. Умова узгодження порушується через складний характер хвильового опору розрядної лінії, зміну опору комутаційного пристрою під час розряду лінії, а також внаслідок дії паразитних ємностей.

Поряд з неузгодженістю, яка є причиною утворення помилкових імпульсів, паразитні ємності також призводять до спотворення фронту та зрізу сформованих імпульсів навіть при $R_H = Z_0$.

Розробка джерела енергії для генератора високоенергетичних ЕМІ. Сучасний рівень розробки та застосування імпульсних технологій вимагає використання потужних та надійних джерел живлення, здатних працювати в частотному режимі, особливо в автономних пристроях.

Ємнісний накопичувач енергії широко використовується у фізичних експериментах завдяки ряду переваг:

- Низький внутрішній опір ($<10^{-3}$ Ом);
- Низька індуктивність (до 10^{-9} Гн).

Це забезпечує низький час розряду (10^{-4} – 10^{-8} с), високоєфективну передачу енергії навантаженню, можливість досягнення рекордних значень потужності (до 10^{13} Вт) і швидкості зростання струму (10^{13} А/с). Крім того, вони мають ряд зручностей в експлуатації, таких як: відсутність рухомих частин, простота обслуговування, модульна конструкція, що дозволяє вимикати та легко замінювати елементи у випадку випадкових пошкоджень.

Конденсатори, які використовуються в генераторах імпульсних струмів, часто працюють близько до режиму короткого замикання, коливальний розряд на малу індуктивність при частоті індуктивності коливань 10^4 – 10^7 Гц. Основна вимога до конденсатора – зберігати максимально можливу енергію на одиницю об'єму. Він визначається робочою напругою E_0 , при якій працює ізоляція, і діелектричною проникністю ε ізоляції.

Тому для генерації імпульсу високої енергії в якості основи пристрою було обрано чотири пускові конденсатори Picanil CBV60 ємністю 25 мкФ. Регулювання потужності забезпечується реле LIMING. Допустиме навантаження на реле 24 В, 30 А/40 А. Потужність імпульсу буде регулюватися за допомогою кнопок керування «КЕА-4103 О2», які залежать від бажаного імпульсу, вмикають або вимикають конденсатори в ланцюзі.

Схематичне електричне коло генератора імпульсів високої напруги та енергії показано на рис. 2. Система керування базується на базовому мікроконтролері ATmega328, як у [10, 17]. Живлення зазначеного мікроконтролера та низьковольтної логіки

забезпечується перетворювачем постійного струму 12 В/5 В.

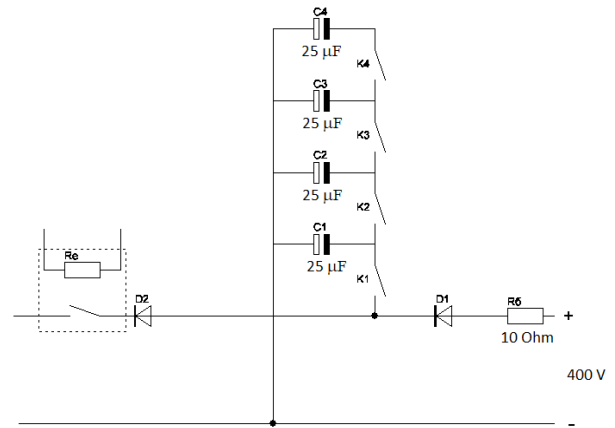


Рисунок 2 – Принципова схема генератора імпульсів високої енергії

Стандартний перетворювач змінного/постійного струму використовується для живлення високовольтного перетворювача та системи управління (пристрій в цілому). Керування та комутація мікроконтролером зовнішньої лінії забезпечується за рахунок модулів реле типу JQC-3FF-S. Модулі реле мають допустиме навантаження до 15 А і оснащені оптичною ізоляцією на основі оптронів PC817. Інформація відображається за допомогою стандартного символічного дисплею WH1602.

Однак при цьому можуть виникнути проблеми з недостатньою кількістю портів мікроконтролера, коли потрібно підключити екран з великою кількістю контактів. Вирішенням цієї проблеми може стати перехід на протокол I2C, який використовує лише 4 виводи. I2C/ІІС (Inter-Integrated Circuit) – це протокол, спочатку створений для зв'язку інтегральних схем в електронному пристрої. Протокол I2C базується на 8-бітовій шині, яка потрібна для з'єднання блоків в контрольованій електроніці та системних адресах, щоб забезпечити можливість комунікації по одному і тому ж проводу з кількома пристроями за рахунок передачі дані на той чи інший пристрій, додаючи до пакету даних ідентифікатор бажаного елемента. Найпростіша схема I2C може містити один пристрій керування (найчастіше мікроконтролер) і кілька керованих (наприклад, РК-дисплей). Кожен пристрій має адресу в діапазоні від 7 до 127. Двох пристроїв з однаковою адресою в одній схемі бути не повинно. Плата Arduino підтримує I2C на апаратному рівні. Для підключення пристроїв відповідно до цього протоколу можна використовувати шини А4 та А5. Наявна швидкість і зручна можливість використання I2C дисплея – це використання окремого модуля I2C – адаптера. Рідкокристалічний монітор із підтримкою I2C підключений до мікроконтролера через чотири провідника – два для передачі даних, два – для живлення. Схема підключення показана на рис. 3.

Керування режимами роботи пристрою разом із класичними кнопками реалізовано за допомогою енкодера KY-040. Модуль енкодера являє собою механічний датчик кута, він перетворює кут повороту обертового об'єкта (наприклад, вала) в електричні сигнали, зміщені на 90 градусів відносно один одного. Цей модуль має три виводи – CLK, DT і SW. Сигнали, зміщені на 90 градусів відносно один одного, з'являються на клемках CLK і DT при обертанні за/проти годинникової стрілки, вихід SW використовується для отримання стану центральної осі енкодера, яка виконує роль кнопки.



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд генератора імпульсів високої енергії

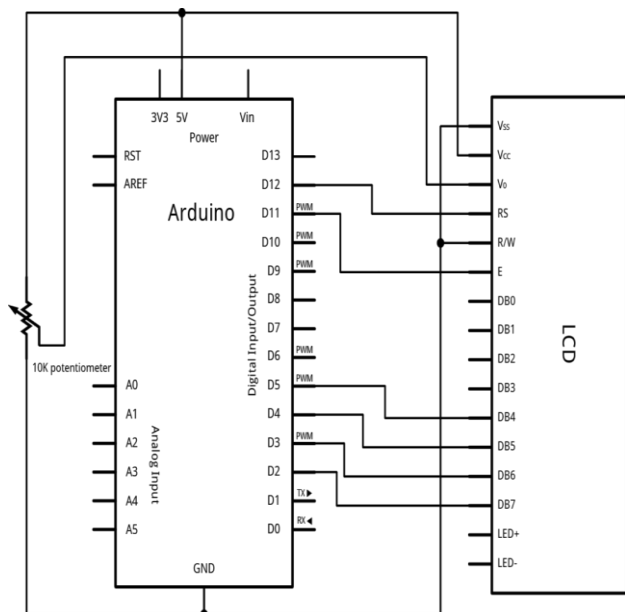


Рис. 3. Схема підключення РК-дисплею WH1602 з модулем I2C

На основі схеми роботи генератора, зображеної на рисунку 2, та на основі основних конструктивних елементів, які описані вище, було розраховано та реалізовано джерело високої енергії та пристрій керування зазначеним генератором.

Експериментальна апробація. Для експериментальної апробації розробленого пристрою керування та живлення, відповідно до викладеного вище, на основі схеми роботи генератора, показаної на рис. 2, та на основі основних конструктивних елементів, був розрахований та виготовлений генератор високоенергетичних імпульсів зовнішній вигляд та компоновка якого показані на рис. 4 та 5, відповідно.



Рисунок 5 – Внутрішня компоновка генератора імпульсів високої енергії

Для апробації генератор був підключений до осцилографа та тестового джерела живлення. В якості навантаження використовувався стандартизований опір 10 кОм. Отримана осцилограма розряду конденсатора показана на рис. 6.

Для порівняння отриманих результатів були проведені випробування наносекундного генератора імпульсів, розробленого в [9, 10] на основі високовольтного джерела постійного струму (рис. 7).

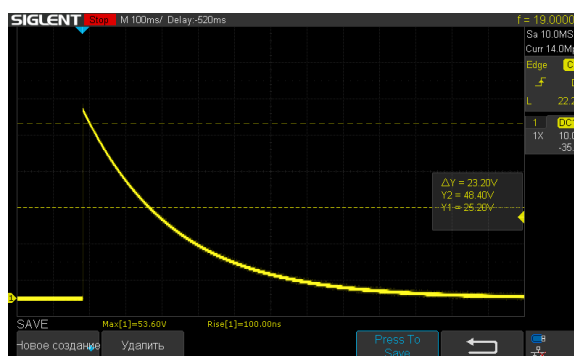


Рисунок 6 – Осцилограма розряду конденсатора



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд високовольтного імпульсного генератора розроблений [9, 10]

В якості навантаження використовується стандартизований опір 50 Ом, що випадку менше опору Z_0 і дозволяє отримати одиночний імпульс. Приклад імпульсу показаний на рисунку 8.

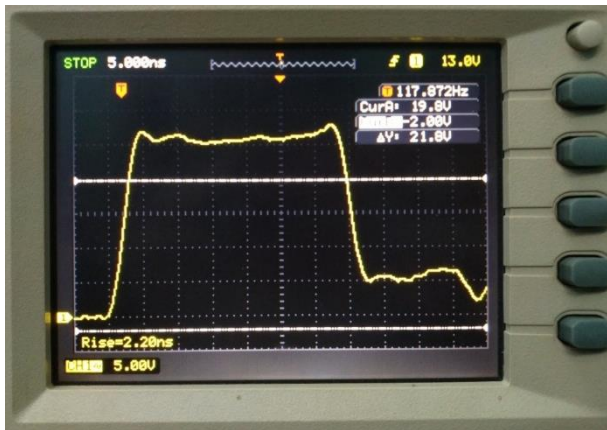


Рисунок 8 – Приклад одиночного імпульсу генератора наносекундних імпульсів

Варіант генератора, розроблений у [9, 10] дозволяє реалізувати вплив на дослідні зразки (елементи захисту або власне РЕО) імпульсами ЕМІ з такими параметрами:

- тривалість імпульсу дорівнює приблизно 30 нс, що обумовлено довжиною зарядової лінії (5 м, близько 5–6 нс на метр);
- фронт зростання імпульсу становить близько 2,2–2,4 нс, що достатньо для запланованих досліджень.

Як видно з порівняння наведених вище даних, а також з порівняння рис. 6 і 8, раніше розроблений генератор, що живиться від високовольтного джерела, дозволяє отримувати імпульси, максимально наближені до прямокутника форми з мінімальним тривалістю фронту підйому.

У той же час особливості форми імпульсу, показані на рисунку 6, зумовлені в першу чергу специфікою процесу розряду конденсатора, що використовується в цьому випадку як джерело енергії ЕМІ. Розроблений варіант генератора ЕМІ на основі

конденсатора дозволяє піддавати елементи РЕО та елементи захисту імпульсам набагато більшої потужності, ніж у випадку використання попереднього варіанту генератора.

Як результат, доцільно використовувати обидва генератори ЕМІ разом для цілей дослідження. Наприклад, за допомогою відносно малопотужного генератора імпульсів прямокутної форми можна з високою точністю досліджувати часові характеристики перемикання елементів захисту. Генератор на основі конденсаторів дозволить встановити граничні рівні потужності ЕМІ, які можуть бути відведені елементами захисту від пристроїв РЕО.

Висновки. У цій статті розроблено та виготовлено електронний пристрій керування та живлення генератора електромагнітних імпульсів високої енергії.

Створено набір генераторів ЕМІ, застосування яких дозволить вивчити властивості елементів захисту РЕО в широкому діапазоні потужностей впливу ЕМІ.

У комбінації з попередньо розробленою конструкцією генератора ЕМІ це дозволить впливати на досліджувані зразки РЕО та елементів захисту шляхом комплексного впливу імпульсів ЕМІ, які матимуть як надкороткий час зростання, так і велику енергію.

Пристрій керування та живлення забезпечує генерацію імпульсів ЕМІ напругою в діапазоні від 40 до 400 В з можливістю поетапного регулювання, а також реалізовані ручні та автоматичні контрольовані режими роботи з послідовними імпульсами з періодом від 1 с до годин.

Для забезпечення комфортної та безпечної дослідницької роботи пристрій має візуальну індикацію режимів роботи, зокрема режимів генерації високої постійної напруги.

Розроблений пристрій керування та живлення генератора імпульсів високої енергії ЕМІ відповідає вимогам, встановленим під час його розробки, і може бути застосований для вивчення особливостей взаємодії напівпровідникових тонкоплівкових шарів з високоенергетичними електромагнітними імпульсами.

Список літератури

1. Ghosh C. N. EMP weapons. *Strategic Analysis*. 2008. Vol. 24, no. 7. P. 1333–1350.
2. Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R. Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. Vol. 31. P. 3855–3860. doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
3. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., Khrypunov G. S., Kharchenko M. M. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 108–111. doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
4. Klochko N. P., Klepikova K. S., Khrypunov G. S., Volkova N. D., Kopach V. R., Lyubov V. M., Kirichenko M. V., Kopach A. V. Antireflective nanostructured zinc oxide arrays produced by pulsed electrodeposition. *Semiconductors*. 2015. Vol. 49. P. 214–223. doi: 10.1134/S1063782615020116.

5. Zhan T., Yamato R., Hashimoto S., Tomita M., Oba S., Himeda Y., Mesaki K., Takezawa H., Yokogawa R., Xu Y., Matsukawa T., Ogura A., Kamakura Y., Watanabe T. Miniaturized planar Si-nanowire micro-thermoelectric generator using exuded thermal field for power generation. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018. Vol. 19, no. 1. P. 443-453. doi: 10.1080/14686996.2018.1460177.
6. He M., Lin Y.-J., Chiu C.-M., Yang W., Zhang B., Yun D., Lin Z.-H. A flexible photo-thermoelectric nanogenerator based on MoS₂/PU photothermal layer for infrared light harvesting. *Nano Energy*. 2018. Vol. 49. P. 588–595. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.04.072.
7. Rezinkin O., Rezinkina M., Danyluk A., Tomashevskiy R. Formation of high-voltage pulses with nanosecond fronts in low-impedance loads. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 464–467. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8880015.
8. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., Lukyanov E. O., Khrypunov G. S., Samofalov V. N. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*. 2010. Vol. 17, no. 4. P. 554–557.
9. Kirichenko M. V., Khrypunov G. S., Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Drozdov A. N. EMI protection elements on cadmium telluride thin films. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 459, no. 1. P. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012009.
10. Kirichenko M. V., Drozdov A. N., Zaitsev R. V., Khrypunov G. S., Drozdova A. A., Zaitseva L. V. Design of Electronic Devices Stress Testing System with Charging Line Based Impulse Generator. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 38–42. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250146.
11. Halim N. H., Azmi A., Yahya Y., Abdullah F., Othman M., Laili M. S. Development of a small scale standard lightning impulse current generator. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2011. P. 426–431. doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970422.
12. Nishore N. K., Bhakta P., Sharan R. K. On The Development of An Impulse Current Generator. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*. 1997. P. 401–406. doi: 10.1109/ICEMIC.1997.669839.
13. Haryono T., Sirait K. T., Tumiran, Berahim H. The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator. *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2008. P. 339–343. doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773942.
14. Nunnally W. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1990. Vol. 37, no. 12. P. 2439–2448. doi: 10.1109/16.64516.
15. Abdel-Salam E. M., Khalifa M. *High Voltage Generation: theory and practice*. High Voltage Engineering. New York: Marcel Dekker. 2000. P. 519–566.
16. Lin M., Liao H., Liu M., Zhu G., Yang Z., Shi P., Lu Q., Sun X. A 7.8 kV nanosecond pulse generator with a 500 Hz repetition rate. *Journal of Instrumentation*. 2018. Vol. 13, no. 4. P. P04004. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/P04004.
17. Rai S. K., Dhakar A. K., Pal U. N. A compact nanosecond pulse generator for DBD tube characterization. *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 033505. doi: 10.1063/1.5017564.
- preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. pp. 108–111. doi: 10.1109/YSF.2017.8126600.
4. Klochko N. P., Klepikova K. S., Khrypunov G. S., Volkova N. D., Kopach V. R., Lyubov V. M., Kirichenko M. V., Kopach A. V. Antireflective nanostructured zinc oxide arrays produced by pulsed electrodeposition. *Semiconductors*. 2015, vol. 49, pp. 214–223. doi: 10.1134/S1063782615020116.
5. Zhan T., Yamato R., Hashimoto S., Tomita M., Oba S., Himeda Y., Mesaki K., Takezawa H., Yokogawa R., Xu Y., Matsukawa T., Ogura A., Kamakura Y., Watanabe T. Miniaturized planar Si-nanowire micro-thermoelectric generator using exuded thermal field for power generation. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018, vol. 19, no. 1, pp. 443-453. doi: 10.1080/14686996.2018.1460177.
6. He M., Lin Y.-J., Chiu C.-M., Yang W., Zhang B., Yun D., Lin Z.-H. A flexible photo-thermoelectric nanogenerator based on MoS₂/PU photothermal layer for infrared light harvesting. *Nano Energy*. 2018, vol. 49, pp. 588–595. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.04.072.
7. Rezinkin O., Rezinkina M., Danyluk A., Tomashevskiy R. Formation of high-voltage pulses with nanosecond fronts in low-impedance loads. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019, pp. 464–467. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8880015.
8. Zaitsev R. V., Kopach V. R., Kirichenko M. V., Lukyanov E. O., Khrypunov G. S., Samofalov V. N. Single-crystal silicon solar cell efficiency increase in magnetic field. *Functional Materials*. 2010, vol. 17, no. 4, pp. 554–557.
9. Kirichenko M. V., Khrypunov G. S., Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Drozdov A. N. EMI protection elements on cadmium telluride thin films. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 459, no. 1, pp. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/459/1/012009.
10. Kirichenko M. V., Drozdov A. N., Zaitsev R. V., Khrypunov G. S., Drozdova A. A., Zaitseva L. V. Design of Electronic Devices Stress Testing System with Charging Line Based Impulse Generator. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020, pp. 38–42. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250146.
11. Halim N. H., Azmi A., Yahya Y., Abdullah F., Othman M., Laili M. S. Development of a small scale standard lightning impulse current generator. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2011, pp. 426–431. doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970422.
12. Nishore N. K., Bhakta P., Sharan R. K. On The Development of An Impulse Current Generator. *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*. 1997, pp. 401–406. doi: 10.1109/ICEMIC.1997.669839.
13. Haryono T., Sirait K. T., Tumiran, Berahim H. The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator. *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2008, pp. 339–343. doi: 10.1109/ICHVE.2008.4773942.
14. Nunnally W. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1990, vol. 37, no. 12, pp. 2439–2448. doi: 10.1109/16.64516.
15. Abdel-Salam E. M., Khalifa M. *High Voltage Generation: theory and practice*. High Voltage Engineering. New York: Marcel Dekker. 2000, pp. 519–566.
16. Lin M., Liao H., Liu M., Zhu G., Yang Z., Shi P., Lu Q., Sun X. A 7.8 kV nanosecond pulse generator with a 500 Hz repetition rate. *Journal of Instrumentation*. 2018, vol. 13, no. 4, pp. P04004. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/P04004.
17. Rai S. K., Dhakar A. K., Pal U. N. A compact nanosecond pulse generator for DBD tube characterization. *Review of Scientific Instruments*. 2018, vol. 89, no. 3, pp. 033505. doi: 10.1063/1.5017564.

References (transliterated)

1. Ghosh C. N. EMP weapons. *Strategic Analysis*. 2008, vol. 24, no. 7, pp. 1333–1350.
2. Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R. Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, pp. 3855–3860. doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
3. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., Khrypunov G. S., Kharchenko M. M. Adopting of DC magnetron sputtering method for

Надійшло (received) 07.10.2021

Шкода Дмитро Сергійович (Шкода Дмитрий Сергеевич, Dmytro Shkoda) – аспірант кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-9755>; e-mail: dmytro.skoda@khpі.edu.ua.

Кіріченко Михайло Валерійович (Кириченко Михаил Валерьевич, Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: mykhailo.kirichenko@khpі.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович (Зайцев Роман Валентинович, Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khpі.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна (Минакова Ксения Александровна, Kseniia Minakova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: kseniiia.minakova@khpі.edu.ua.

Білик Сергій Юрійович (Белик Сергей Юрьевич, Serhii Bilyk) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8813-5652>; e-mail: serhii.bilyk@khpі.edu.ua.