

О.І. Христо

Енергетичні характеристики наносекундного переривника струму вихідної ланки магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів

У даній роботі використовується комплексний підхід, спрямований на дослідження електромагнітних процесів у схемі магнітно-напівпровідникового генератора імпульсів з наносекундним переривником струму, який враховує топологію схеми, конструктивні параметри комутуючого дроселя, криву намагнічування його осердя, еквівалентний опір навантаження, а також часові параметри періодичної комутації силових ключів. Запропоновано модель наносекундного переривника струму паралельної ланки магнітного стиснення на основі експоненційного зростання його активного опору. Отримано аналітичні вирази, що описують електричні та енергетичні характеристики переривника струму при роботі на активне навантаження. Виконане числове моделювання переривника струму у двохконтурній схемі магнітного генератора імпульсів з урахуванням нелінійності кривої намагнічування комутуючих дроселів. Розглянуто три режими його роботи в залежності від моменту початку обриву струму зворотної провідності. Проведено аналіз роботи переривника струму на навантаження з активно-ємнісною складовою. Результати досліджень можуть бути застосовані при розробці високовольтних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів з поліпшеними енергодинамічними параметрами. Бібл. 20, рис. 10.

Ключові слова: магнітно-напівпровідниковий генератор імпульсів, переривник струму, комутуючий дросель, крива намагнічування, числове моделювання.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день одним з перспективних напрямів наносекундної імпульсної техніки є використання комбінації індуктивного накопичувача й напівпровідникового переривника струму, що дозволяє посилити імпульсну потужність на навантаженні. Переважна більшість публікацій по даній тематиці стосується здебільшого аналізу фізичних процесів у самій структурі напівпровідникового діода у межах окремого коливального контуру індуктивного накопичувача, що виконуються за умови узгодженої передачі енергії від генератора до навантаження. У цьому сенсі ефективність перетворення потрібно визначати за рахунок сумісної електромагнітної взаємодії між нелінійними ланками стиснення, переривником струму та навантаженням. Крім того односпрямована передача енергії від генератора до навантаження є окремим випадком з усієї множини енергетичних режимів коливальних магнітно-напівпровідникових генераторів імпульсів.

Аналіз останніх досліджень й публікацій. Магнітно-напівпровідникові генератори імпульсів (МНГІ) [1, 2] – це клас перетворювальної техніки, який початково був розроблений для живлення СВЧ випромінювачів та накачування газових лазерів [3], де гострота фронту імпульсу відіграє первинне значення. За останнє десятиліття МНГІ почали все ширше використовуватися у електророзрядних технологіях очищення і дезінфекції води [4, 5], іонізації повітря стримерним розрядом для видалення токсичних домішок [6, 7], а також для обробки агрокультур [8] або пастеризації їжі [9]. Низькотемпературна плазма бар'єрного або коронного розрядів зазначених технологій є головним інструментом обробки первинного середовища (матеріалу) для усунення у ньому шкідливих речовин. Зазвичай плазма цих розрядів підтримується за рахунок вивільнення енергії з ємнісного накопичувача, але потреба підвищення пікової потужності імпульсу та коефіцієнта ефективності перетворення енергії зумовило необхідність розробки МНГІ з індуктивними накопичувачами енергії. Це стало можливим завдяки використанню разом з традиційними ланками магнітного стиснення й напівпровідникових переривників струму, що представляють собою високолеговані

діоди з ефектом різкого обриву зворотного струму провідності (SOS-діоди) [10, 11].

Традиційна модель напівпровідникового діода [12-14] розглядає систему диференціальних рівнянь електронно-діркової плазми для неперервності заряджених частинок, рівняння електростатичного поля та теплопровідності, що мають нелінійні коефіцієнти (рухливість, іонізація та рекомбінація) залежні у свою чергу від напруженості електричного поля та температури. При цьому диференціальні рівняння електричного колу не беруть до уваги нелінійність кривої намагнічування комутуючого дроселя (КД) та розглядаються з фіксованими параметрами. Одночасне розв'язання гіперболічного рівняння для заряджених частинок з рівнянням Пуассона (еліптичного типу) може викликати нестійкість розрахунку, особливо у випадку різкої зміни потенціалу між сусідніми вузлами розрахункової сітки, що перевищує значення відношення kT/q . Ця обставина потребує застосування особливих алгоритмів розрахунку [15] (різницява схема Гумеля-Шарфетера), направлених на згладжування розрахункової сітки. Ще одним недоліком цієї моделі є те, що фази прямої та зворотної провідності діода розглядаються від двох незалежних контурів за умови нехтування струмами намагнічування КД ланки стиснення.

Більш спрощений варіант запропоновано у [16], де високовольтний перетворювач, моделюється за допомогою ідеального джерела струму, який змінює свій струм через індуктивність насиченого КД по експонентній залежності. В результаті отримано аналітичний вираз, який описує характер імпульсу на активно-ємнісному навантаженні, що дозволяє визначити енергію і потужність, що виділяються на навантаженні. У той же час модель не дозволяє розраховувати енергію, яка розсіюється на самому діодному переривнику під час виконання перетворення. Однозначно, що втрати енергії у переривнику будуть визначатися як тривалістю обриву зворотного струму, так і параметрами навантаження. Крім того, для більш точного розрахунку модель повинна враховувати також індуктивну складову електророзрядного наван-

© О.І. Христо

таження, так як довжина з'єднувальних дротів може істотно впливати на характер формування наносекундних імпульсів.

Відокремлення раніше не вирішеної частини завдань. Досвід моделювання різних варіантів МНП та аналіз існуючих, у тому числі наведених вище, показує, що є ряд питань які неможливо ефективно вирішити, спираючись тільки на відомі знання у цій галузі. По-перше, при сумісному моделюванні ланки стиснення з переривником струму потрібно враховувати нелінійний характер намагнічування КД цієї ланки. Це пояснюється тим, що в контурі зворотної провідності діода розрядний струм конденсатора ланки стиснення має складний характер, що складається з двох гармонічних складових. Перша гармоніка відображає процес намагнічування сердечника дроселя, що комутує, а друга – процес його насичення. Якщо у струмі зворотної провідності діода відсутня друга гармоніка, значить КД не насичується до моменту обриву і ланка стиснення не функціонує належним чином. Змінюючи гармонічний склад зворотного струму відповідно можна вплинути на величину струму, у якому реалізується його обрив. По-друге, потрібно зазначити, що реальне технологічне навантаження має нелінійний характер з реактивною складовою та активним опором, що може змінюватися від одиниць мОм до десятків кОм.

Мета роботи – розробка математичної моделі наносекундного переривника струму для визначення його електричних та енергетичних характеристик у складі високовольтної паралельної ланки магнітного стиснення, залежно від тривалості та моменту обриву струму, еквівалентної схеми заміщення опору навантаження та встановлення найбільш оптимальних режимів його роботи.

Методи дослідження: метод математичного моделювання перетворювальних пристроїв, числовий метод аналізу систем нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь та метод наближеного аналітичного вираження характеристик нелінійних елементів.

Викладення основного матеріалу. Принцип роботи SOS-діодів можна розділити на дві фази: у першій фазі при протіканні прямого струму відбувається накопичення заряду у високолегованих областях напівпровідникової структури; у другій фазі при проходженні зворотного струму до діода прикладається зворотна напруга, що забезпечує винесення накопиченого заряду з високолегованих областей з подальшим утворенням області об'ємного заряду поблизу р-п переходу, що призводить до різкого обриву струму через діод і зростанню на ньому напруги.

Обрив індуктивного струму відбувається в результаті різкого зростання внутрішнього опору напівпровідникового перетворювача на стадії протікання через нього зворотного струму. Найбільш фізично близькою для опису різкого обриву струму є модель переривника на основі експоненціального зростання його опору

$$R = R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t), \quad (1)$$

де α характеризує швидкість зростання опору переривника.

Припустимо, що обрив струму настає в момент досягнення його максимуму, коли в індуктивності насиче-

ного КД запасастся максимальна енергія. Тоді схема заміщення буде виглядати як паралельне з'єднання індуктивності КД, переривника й навантаження.

Параметри схеми вибрані наступні: індуктивність накопичувача магнітної енергії $L_{sr} = 1 \text{ мкГн}$, початковий струм, який обриває переривник – $I_0 = 100 \text{ А}$, початковий опір переривника – $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$, опір навантаження $R_L = 150 \text{ Ом}$.

Диференціальне рівняння для індуктивного контуру з переривником струму:

$$L_{sr} \frac{di_0}{dt} + \frac{R_L \cdot R_0 e^{\alpha t}}{R_L + R_0 e^{\alpha t}} \cdot i_0 = 0 \quad (2)$$

є однорідним диференціальним рівнянням першого порядку, рішенням якого є функція виду:

$$i_0(t) = A \cdot \exp \left[- \int \frac{R_L \cdot R_0 e^{\alpha t}}{L_{sr} (R_L + R_0 e^{\alpha t})} dt \right], \quad (3)$$

де $A = \frac{I_0}{\exp \left[- \frac{R_L}{\alpha \cdot L_{sr}} \ln(R_L + R_0) \right]}$ – стала, яка визначається при нульових початкових умовах.

Загальне рішення рівняння (2):

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\exp \left[- \frac{R_L}{\alpha \cdot L_{sr}} \ln(R_L + R_0) \right]} \times \exp \left[- \frac{R_L}{\alpha \cdot L_{sr}} \ln(R_L + R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t)) \right]. \quad (4)$$

Струм через переривник:

$$i_1(t) = \frac{i_0(t)}{\frac{R_0}{R_L} \exp(\alpha \cdot t) + 1}. \quad (5)$$

Струм у навантаженні:

$$i_2(t) = \frac{i_0(t) \cdot R_0 \exp(\alpha \cdot t)}{R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t) + R_L}. \quad (6)$$

Енергія, що розсіюється на навантаженні:

$$E_{RL} = \int_0^{\infty} i_2^2(t) \cdot R_L dt. \quad (7)$$

$$E_{RL} = \int_0^{\infty} \frac{i_0^2(t) \cdot R_0^2 \exp(2\alpha \cdot t)}{(R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t) + R_L)^2} R_L dt =$$

$$= - \frac{0,5 \cdot A^2 \cdot L_{sr}}{(R_L + R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t))^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}} \times \left(R_0 \exp(\alpha \cdot t) + L_{sr} \cdot \alpha \cdot \frac{R_L}{\alpha L_{sr} + 2R_L} \right) \Big|_0^{\infty}.$$

Так як, $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{(R_L + R_0 \exp(\alpha \cdot t))^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}} = 0$, то маємо:

$$E_{RL} = \frac{0,5 \cdot A^2 \cdot L_{sr}}{(R_L + R_0)^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}} \left(R_0 + \frac{L_{sr} \cdot \alpha \cdot R_L}{\alpha L_{sr} + 2R_L} \right). \quad (8)$$

Енергія, що розсіюється на перетворювачі:

$$E_d = \int_0^{\infty} i_1^2(t) \cdot R_0 \exp(\alpha \cdot t) dt. \quad (9)$$

$$E_d = \int_0^{\infty} \frac{i_0^2(t) \cdot R_0 \exp(\alpha \cdot t)}{(R_0 \cdot \exp(\alpha \cdot t) + R_L)^2} R_L^2 dt =$$

$$= \frac{A^2 \cdot L_{sr} \cdot R_L^2}{(\alpha L_{sr} + 2R_L)(R_L + R_0 \exp(\alpha \cdot t))^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}} \Big|_0^{\infty}.$$

$$E_d = \frac{A^2 \cdot L_{sr} \cdot R_L^2}{(\alpha L_{sr} + 2R_L)(R_L + R_0)^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}}. \quad (10)$$

Ефективність перетворення оцінюється як відношення енергії, що розсіюється на навантаженні, до енергії, що запасається у індуктивності L_{sr} .

$$K_{eff} = \frac{\exp\left(\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} \ln(R_L + R_0)\right)}{(R_L + R_0)^{\frac{2R_L}{\alpha L_{sr}} + 1}} \cdot \left(R_0 + \frac{L_{sr} \cdot \alpha \cdot R_L}{\alpha L_{sr} + 2R_L}\right). \quad (11)$$

На рис. 1,а,б показані характеристики миттєвої потужності, що розсіюється на навантаженні й ключі залежно від швидкості обриву струму з постійним опором навантаження $R_L = 150$ Ом, а на рис. 1,б,г показані відповідні характеристики енергії, що розсіюється на навантаженні й на ключі в тій же залежності. Коефіцієнт експоненційної функції для відповідного графіка: 1 – 10^9 , 2 – $10^{9,2}$, 3 – $10^{9,5}$. Кількісне значення зазначених коефіцієнтів було обрано саме такими для забезпечення математичних розрахунків, які б задовольнили наносекундному діапазону тривалості процесу перемикання переривника струму. Час досягнення потужності максимального значення кожної з характеристик на рис. 1,а відповідно дорівнює: 1 – 9.4 нс, 2 – 6.4 нс, – 3.4 нс. При цьому для максимального та мінімального часу обриву струму амплітуда напруги на навантаженні становить 6 кВ та 12,2 кВ відповідно.

З рис. 1 помітно, що пікове значення характеристики потужності, що виділяється на навантаженні і на переривнику рознесені в часі, самі характеристики мають різну площу, а відповідно і різну енергію, що розсіюється. Енергія, що розсіюється на навантаженні та на переривнику в порядку збільшення коефіцієнта експоненційної функції відповідно дорівнює: $E_{RL} = 3.8$ мДж, 4,2 мДж, 4,5 мДж; $E_d = 1.1$ мДж, 0,8 мДж, 0,4 мДж. Таким чином, зі збільшенням швидкості обриву струму зменшується енергія, що розсіюється на ключі, а отже, збільшується енергія, що розсіюється на навантаженні.

На рис. 2 наведено характеристики виділеної енергії на навантаженні та на переривнику в залежності від опору навантаження при фіксованому значенні коефіцієнта α . За характеристиками помітно, що зі збільшенням опору навантаження збільшується енергія, що розсіюється на ключі. Так для значення коефіцієнта $\alpha = 10^9$, енергія, що розсіюється, на ключі стане рівною енергії розсіювання на навантаженні при його опорі $R_L = 500$ Ом. Реальне технологічне навантаження, як наприклад лазерна трубка або бар'єрний розряд є складним параметричним навантаженням, в якому потрібно враховувати індуктивність розрядного контуру і ємність електродної системи.

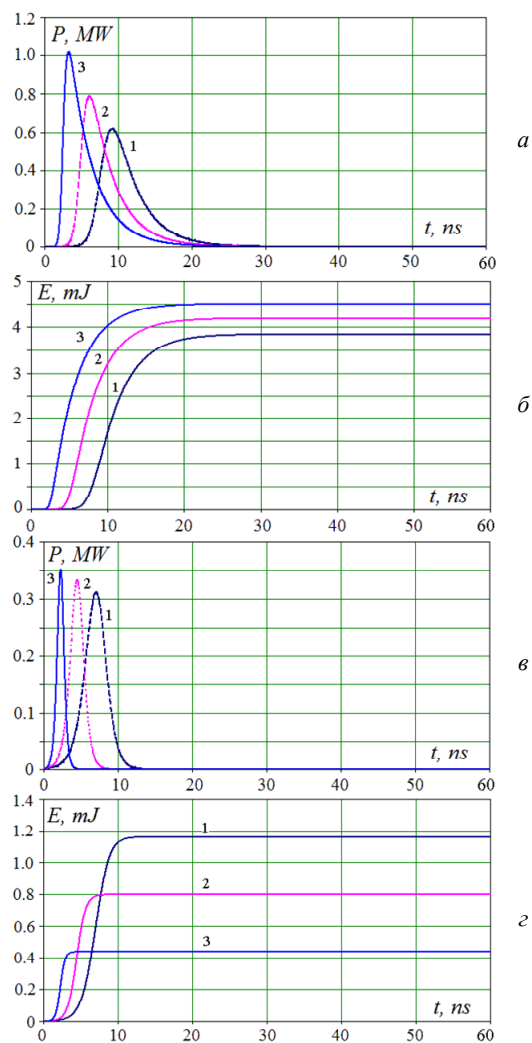


Рис. 1. Характеристики розсіюваної потужності та енергії: а) розсіювана потужність на навантаженні; б) розсіювана енергія на навантаженні; в) розсіювана потужність на переривнику; г) розсіювана енергія на переривнику

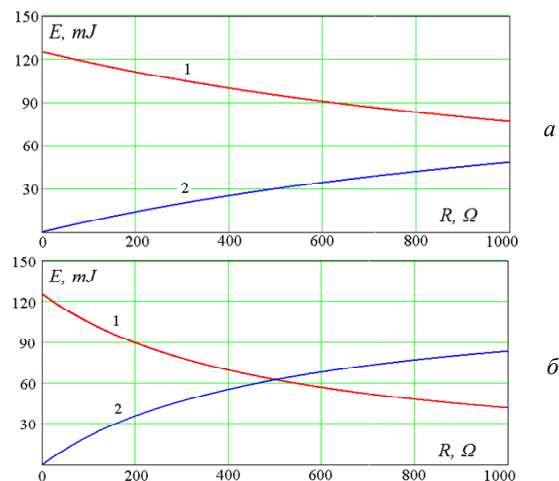


Рис. 2. Характеристика енергії, що розсіюється на навантаженні (1), характеристика енергії, що розсіюється на переривнику (2), залежно від опору навантаження: а) $\alpha = 10^{9,5}$, б) $\alpha = 10^9$

Розглянемо спільну роботу переривника струму з паралельною ланкою компресії імпульсу. Схема двоконтурного накачування напівпровідникового переривника струму показано на рис. 3.

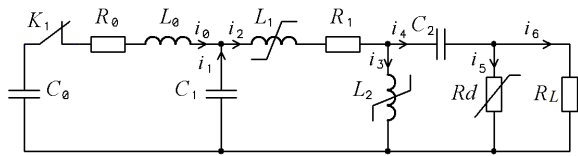


Рис. 3. Еквівалентна схема включення діодного переривника струму з послідовно-паралельною ланкою стиснення

При насиченні КД L_1 відбувається накачування діода прямим струмом, при насиченні КД L_2 через діод проходить зворотний струм більшої амплітуди та меншої тривалості. Розглянемо режими роботи паралельної ланки стиснення при обриві зворотної півхвилі струму у різні моменти часу. Модель КД на основі арктангенсової функції намагнічування його осереддя та її положення викладено у роботі [17]. На підставі законів Кірхгофа складено систему інтегро-диференціальних рівнянь. Для визначення струмів й напруг у контурах генератора за допомогою кінцево-різницевої апроксимації по методу Ейлера [18] отримано систему алгебраїчних рівнянь з нелінійними коефіцієнтами. Інтегральні суми напруг на конденсаторах $C_0 - C_2$ від струмів розраховувались за методом трапецій.

Параметри схеми: ємність конденсаторів $C_0 = C_1 = C_2 = 2.4$ нФ, індуктивність зарядного контуру $L_0 = 120$ мкГн, активний опір першого контуру $R_0 = 1$ Ом, активний опір другого контуру $R_1 = 0.1$ Ом, опір навантаження $R_L = 150$ Ом, об'єми осередь КД L_1 та L_2 узяті однаковими $-V_{m1} = V_{m2} = 31,7 \cdot 10^{-6}$ м³, кількість витків обмоток КД L_1 та $L_2 - w_1 = 35, w_2 = 10$. Крок дискретизації за часом до обриву струму вибирався рівним 2 нс, після обриву $-0,005$ нс. На рис. 4 показані суміщені характеристики енергій на конденсаторах C_1 і C_2 за різних моментів обриву зворотного струму через переривник.

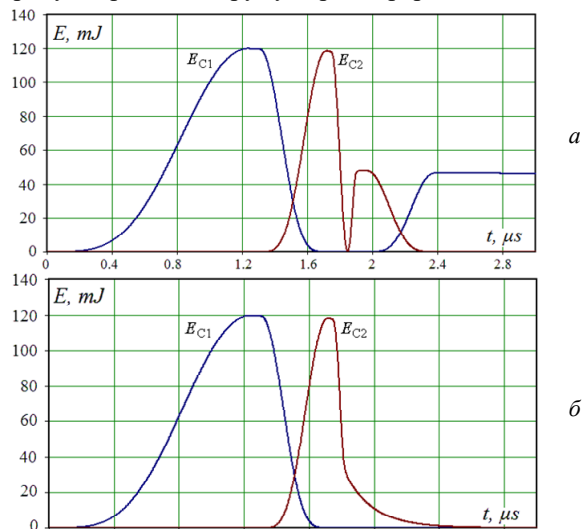


Рис. 4. Енергетичні характеристики ланок компресії імпульсу за різних моментів обриву зворотного струму через переривник:

а) при спаді струму; б) у разі зростання струму

На підставі отриманих результатів моделювання, можна виділити три режими роботи переривника струму спільно з послідовно-паралельною ланкою компресії імпульсу. Режим, коли відбувається обрив струму, що протікає через індуктивність КД L_2 на спаді півхвилі струму, є енергетично неефективним, оскільки КД L_1 насичується повторно і частина енергії повертається в

конденсатор попередньої ланки стиснення (рис. 4,а). Режим з максимальним виділенням потужності відбувається при обриві струму в його максимумі, коли вся енергія зосереджена у магнітному полі індуктивності КД. Режим коли відбувається обрив струму на першій півхвилі є також ефективним і має ту перевагу, що дає можливість формувати на навантаженні імпульс з більш крутим фронтом і тривалим спадом. У цьому випадку енергія у навантаження вкладається як з індуктивного накопичувача L_2 , так й з конденсатора C_2 . При формуванні фронту імпульсу енергія у навантаження вивільняється з індуктивного накопичувача, а при формуванні спаду імпульсу енергія у навантаження вводиться з ємнісного накопичувача.

Розглянемо роботу діодного переривника струму у складі паралельної ланки стиснення на активно-індуктивне та активно-індуктивно-ємнісне навантаження. Варіанти навантажень показано на рис. 5.

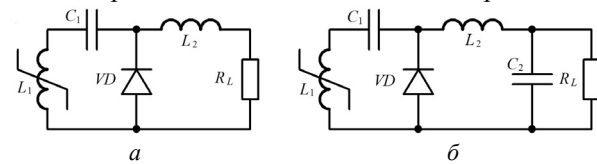


Рис. 5. Варіанти навантажень переривника:

а) активно-індуктивне; б) активно-індуктивно-ємнісне

Моделювання роботи переривника струму на активно індуктивне навантаження. Відповідно до рис. 6,а,б при роботі переривника на активно-індуктивне навантаження, характеристика пікової потужності виділену на навантаженні описується поліноміальною залежністю другого порядку, а та ж характеристика для переривника струму має лінійну зростаючу залежність при зростанні активного опору навантаження від 10 до 500 Ом. У той же час характеристика енергії, що розсіюється на навантаженні має максимум в діапазоні від 120 до 150 Ом, а характеристика виділеної енергії на переривнику має також зростаючий лінійний характер, що й характеристика пікової потужності на ньому.

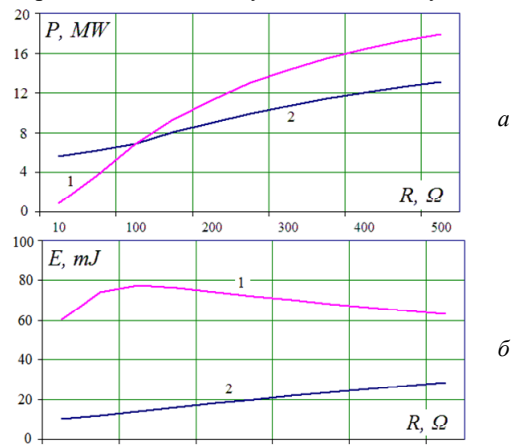


Рис. 6. Характеристики пікової потужності (а) та енергії (б), що розсіюється на навантаженні (1) і на переривнику струму (2) залежно від активного опору навантаження

Моделювання роботи переривника струму на активно-індуктивно-ємнісне навантаження. На рис. 7 показані характеристики для двох значень індуктивності навантаження. Встановлено, що якщо навантаження має ємнісну складову, то в характеристиках пікової потужності на навантаженні, з'являються максимуми.

У той же час характеристики потужності й енергії виділеної на переривнику струму набувають лінійного характеру, тобто ємність дозволяє стабілізувати втрати енергії в переривнику при зміні активного опору навантаження. Також пікова потужність на переривнику струму залежить від індуктивної складової навантаження та зростає зі збільшенням її значення. Різке зниження характеристики в діапазоні від 100 до 10 Ом обумовлено не повною передачею енергії з індуктивності насиченого КД у навантаження і за більш тривалий період коливаний струму частина енергії з індуктивності КД повертається назад в поздовжній конденсатор C_1 . Плавне зниження характеристики у діапазоні від 200 до 500 Ом обумовлено зменшенням пікового значення струму через навантаження.

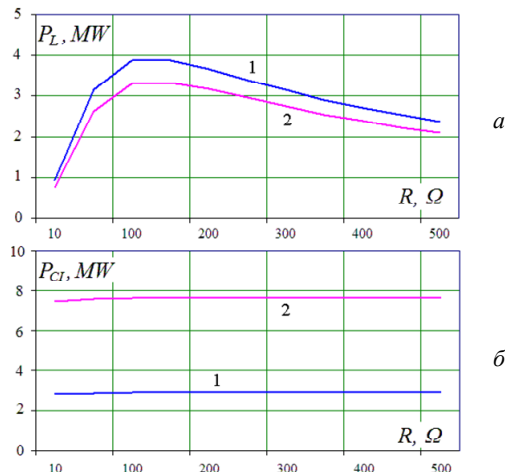


Рис. 7. Характеристики пікової потужності, що розсіюється на навантаженні (а) і на переривнику (б) для двох значень індуктивності навантаження: 1 – 100 нГн; 2 – 300 нГн

При зміні ємності в діапазоні від 10 до 200 пФ характеристики пікової потужності мають спадаючий характер (рис. 8, а). При цьому на навантаженні характеристика падає швидше, ніж на переривнику. Тобто втрати енергії на переривнику струму також стабілізуються при зміні ємнісної складової навантаження. А ось для характеристик струму на навантаженні зі збільшенням її ємності відзначається спад крутизни переднього фронту імпульсу та зростання його тривалості (рис. 8, б).

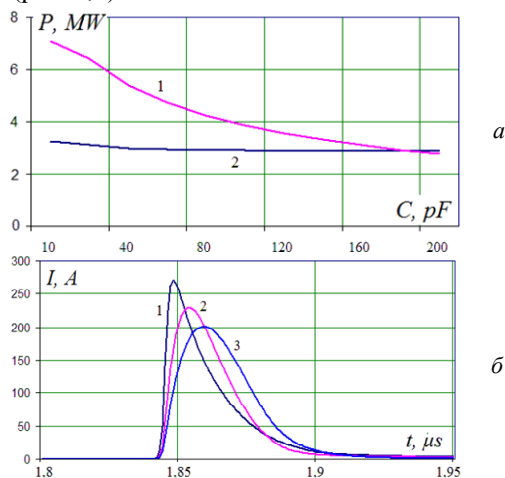


Рис. 8. Характеристики пікової потужності (а) та характеристики струму у навантаженні (б): а) 1 – на навантаженні, 2 – на переривнику струму; б) 1 – $C = 10$ пФ, 2 – 50 пФ, 3 – 100 пФ

Таким чином, ємнісна складова навантаження дозволяє зафіксувати енергію, що виділяється на переривнику у процесі його перемикавання не залежно від активної складової опору навантаження.

Фізичне моделювання напівпровідникового переривника струму. Для реалізації індуктивного обриву струму та підтвердження математичних розрахунків використовувалась двохключова схема МНГІ з паралельно-послідовною ланкою у зарядному контурі, схема якого зображена на рис. 9.

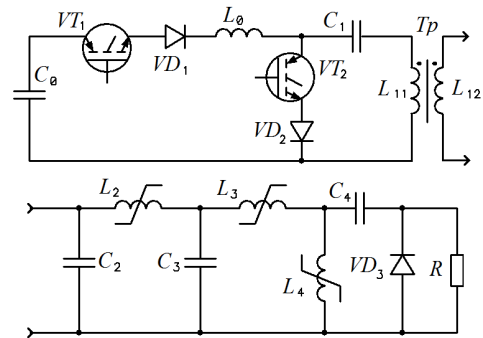


Рис. 9. Принципова схема двохключового МНГІ з вихідною паралельною ланкою компресії імпульсу та напівпровідниковим переривником струму

В якості напівпровідникового переривника струму застосовувались два послідовно з'єднаних високовольтних діода типу КЦ201Е. Конструкція цих діодів представляє собою послідовне з'єднання багатьох лавинних р-п переходів, що дозволяє збільшити максимальну допустиму зворотну напругу, яка пропорційна кількості діодів всередині стовпа. Максимально зворотна напруга для цієї діодної збірки становить 15 кВ. Електричні та конструктивні параметри КД $L_2 - L_4$ та конденсаторів $C_2 - C_4$ високовольтної частини МНГІ, реалізовані такими ж, як у розрахунковій моделі. Навантаження було зібрано з двох послідовних резисторів марки ТВО, кожен з активним опором 24 Ом. Для вимірювання електричних сигналів на переривнику струму було використано ємнісний дільник напруги [19] з коефіцієнтом ділення – 1:11000 та малоіндуктивний шунт струму [20] з опором 0,16 Ом.

На рис. 10 наведено осцилограми струму та напруги напівпровідникового переривника, які можна пояснити наступним чином. Від'ємна напівхвиля струму обумовлена його протіканням по ланці $VD_3 - C_3 - L_3 - C_4$ завдяки вмиканню діода VD_3 у прямому напрямку й характеризує процес заряду конденсатора C_4 . Накопичений заряд конденсатора C_4 прагне вивільнитися по ланці $VD_3 - C_4 - L_4$ – при цьому зворотна напівхвиля струму складається з двох гармонічних складових. Перша гармоніка струму має більший період коливаний і відображає процес намагнічування осердя КД L_4 , друга гармоніка – виникає при його насиченні й має значно менший період коливаний. Крім того, межа між двома станами осердя має область тривалістю 10 нс, для якої диференціальна проникність осердя зростає, що відображається на осцилограмі як припинення зростання струму. Обрив зворотного струму діодом VD_3 здійснюється приблизно за 25 нс. Індуктивний струм обривається, не досягаючи свого максимуму. Тому імпульс на навантаженні матиме крутий фронт і тривалий спад, що підтриму-

ється розрядом конденсатора C_4 . При цьому, зворотна напруга, що розвивається на діоді не перевищує допустимого пробивного значення для цієї збірки. Такий режим роботи переривника повною мірою узгоджується з математичним моделюванням та відповідає результатам зазначеним вище.

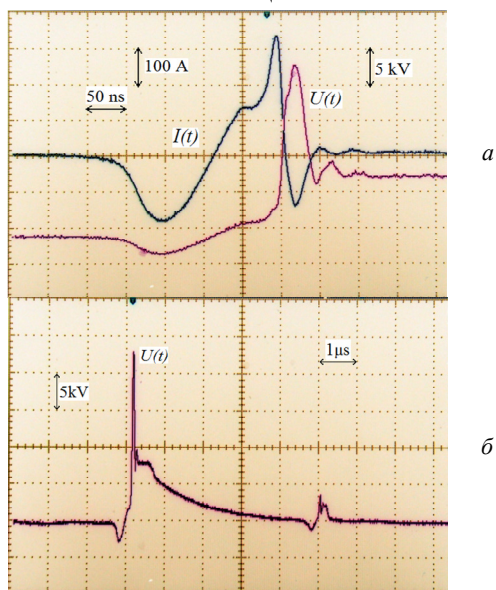


Рис. 10. Осцилограми МНПГ: а) струм $I(t)$ та напруга $U(t)$ напівпровідникового переривника струму, 50 нс/діл; б) напруга на напівпровідниковому переривнику, 1 мкс/діл

Отримані результати досліджень використано в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України при розробці лабораторного варіанту високовольтного МНПГ, що формує імпульси з амплітудою 30 кВ, енергією 0,2 Дж, частотою повторення імпульсів 10 кГц й тривалістю 80 нс, який застосовано у технології електрофільтрації газових викидів.

Висновки. Як показали проведені дослідження, використання напівпровідникового переривника струму у складі паралельної ланки компресії імпульсу дозволяє радикально впливати не тільки на формування фронту імпульсу, але й на його спад. Запропоновано часозалежний експоненційний характер зростання внутрішнього опору наносекундного переривника струму. Отримано аналітичні вирази, що описують електричні та енергетичні характеристики переривника струму у складі послідовно-паралельної схеми його з'єднання з індуктивним накопичувачем та активним навантаженням. Показано, що енергія розсіяна на навантаженні та втрати енергії на переривнику струму описуються дзеркально відображеними функціями з асимптотичною поведінкою. Числове моделювання переривника струму у складі послідовно-паралельної схеми магнітного стиснення імпульсу дозволило виявити три режими його роботи, з яких найбільш ефективними є режими обриву струму в максимумі енергії, що запасається в індуктивності насиченого комутуючого дроселя і режим обриву струму при його наростанні. В останньому випадку енергія в навантаження вкладається в два етапи: при формуванні фронту імпульсу вона вивільняється з індуктивного накопичувача, а при формуванні спаду імпульсу з ємнісного. Виявлено, що при роботі на навантаження з ємнісною складовою у характеристиці пікової потужності залеж-

ною від опору навантаження з'являється оптимум у діапазоні $R_L = 120-150$ Ом. Крім, того встановлено, що ємнісна компонента навантаження призводить до пригнічення виділеної потужності на переривнику струму, тим самим втрати енергії у ньому залишаються практично сталою величиною не залежно від активної складової опору навантаження.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Khrysto O. Energy transfer processes in high-voltage circuits based on magnetic pulse compression. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.15546/aeci-2020-0013>.
2. Li S., Gao J., Yang H., Zhu D., Qian B., Cui Y., Wu Q., Zhang J. Investigation on Adjustable Magnetic Pulse Compressor in Power Supply System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 1540-1547. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2830106>.
3. Choi J. Introduction of the magnetic pulse compressor (MPC) – fundamental review and practical application. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 484-492. doi: <https://doi.org/10.5370/JEET.2010.5.3.484>.
4. Guo X., Zheng D., Blaabjerg F. Power Electronic Pulse Generators for Water Treatment Application: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, no. 10, pp. 10285-10305. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2976145>.
5. Boyko N.I., Makogon A.V. The micro- and nanosecond discharges in gas bubbles for water disinfection and purification. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 50-54. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.08>.
6. Bozhko I.V., Zozulev V.I., Kobylchak V.V. SOS-generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 2, pp. 63-67. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.063>.
7. Pokryvailo A., Yankelevich Y., Wolf M. A High-Power Pulsed Corona Source for Pollution Control Applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, no. 5, pp. 2045-2054. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2004.835952>.
8. Takaki K., Takahashi K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T. Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2021, vol. 5, no. 12. doi: <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>.
9. Tamborrino A., Urbani S., Servili M., Romaniello R., Perone C., Leone A. Pulsed Electric Fields for the Treatment of Olive Pastes in the Oil Extraction Process. *Applied Sciences*, 2019, vol. 10, no. 1, art. no. 114. doi: <https://doi.org/10.3390/app10010114>.
10. Boyko N.I. Powerful generators of high-voltage pulses with nanosecond fronts. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 1, pp. 59-61. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.09>.
11. Weihua Jiang, Yatsui K., Takayama K., Akemoto M., Nakamura E., Shimizu N., Tokuchi A., Rukin S., Tarasenko V., Panchenko A. Compact solid-State switched pulsed power and its applications. *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 7, pp. 1180-1196. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.829003>.
12. Rukin S.N. Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review. *Review of Scientific Instruments*, 2020, vol. 91, no. 1, art. no. 011501. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5128297>.
13. Fardi H. Numerical Analysis of Semiconductor PN Junctions Using MATLABM. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 84-98. doi: <https://doi.org/10.9734/JSRR/2015/14434>.
14. Sharabani Y., Rosenwaks Y., Eger D. Mechanism of fast current interruption in p-π-p diodes for nanosecond opening switches in high-voltage-pulse applications. *Physical Review*

Applied, 2015, vol. 4, no. 1, art. no. 014015. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.4.014015>.

15. Scharfetter D.L., Gummel H.K. Large-signal analysis of a silicon Read diode oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, vol. 16, no. 1, pp. 64-77. doi: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1969.16566>.

16. Pereverzev A.V., Litvinenko T.M. High-voltage converter for electrodischarge neutralization of sulfur dioxide. *Technical Electrodynamics*, 2015, no. 6, pp. 84-89.

17. Khrysto O.I., Zozulev V.I., Sholokh D.O. Numerical simulation of electromagnetic processes in the scheme of magnetic pulse generator. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 2, pp. 22-28.

18. Nurujjaman Md. Enhanced Euler's method to solve first order ordinary differential equations with better accuracy. *Journal of Engineering Mathematics and Statistics*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 1-13. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3731020>.

19. Anokhin Y.L., Brzhezitsky V.O., Haran Y.O., Masliuchenko I.M., Protsenko O.P., Trotsenko Y.O. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 53-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.08>.

20. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Coaxial disk shunt for measuring in the heavy-current chain of high-voltage generator of storm discharges of impulses of current of artificial lightning with the integral of action to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 45-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.07>.

Надійшла (Received) 01.08.2022

Прийнята (Accepted) 22.11.2022

Опублікована (Published) 06.05.2023

Христо Олександр Іванович¹, к.т.н., с.н.с.,

¹ Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, 54018, Миколаїв, пр. Богоявленський, 43-А, e-mail: alexander.khristo@gmail.com

O.I. Khrysto¹, PhD, Senior Researcher,

¹ Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, 43-A, Bogoyavlenskij Avenue, Mykolayiv, 54018, Ukraine.

How to cite this article:

Khrysto O.I. Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 59-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.09>

Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage.

Introduction. A semiconductor diode based on reverse current interruption is used to increase a pulse amplitude and peak power delivered on the process load. Usually, a current interrupter is located in the last stage of semiconductor-magnetic pulse generator (SMPG) and is connected in parallel to the load. **Problem.** Most of publications on this topic mostly concern with analysis of physical processes in the diode structure itself within its oscillating circuit, which is separated from previous SMPG's pulse compression stages under condition of unidirectional energy transfer from the generator to the load. In this sense, the efficiency of conversion should be determined by the joint of electromagnetic interaction between non-linear compression stages, current interrupter and process load. **Goal.** Develop a mathematical model of nanosecond current interrupter to determine its electrical and energy characteristics as part of a high-voltage parallel circuit with magnetic pulse compression, depending on the duration and moment of current interruption, the equivalent circuit for load resistance, and to set the most optimal modes of its operation. **Methodology.** In this work, it is proposed to use a comprehensive approach aimed at the study of electromagnetic processes in the SMPG circuit with a nanosecond current interrupter, which takes into account the topology of circuit, the design parameters of switching reactor, the magnetization curve, the equivalent load resistance, as well as the time parameters of power switches. **Results.** Analytical expressions describing the electrical and energy characteristics of the interrupter when it operating on the active load are obtained. A numerical simulation of interrupter in the SMPG's double-loop pumping circuit is carried out, taking into account a nonlinearity of SR's magnetization curve. Three operation modes of interrupter is described, depending on the initial moment of reverse conduction current interruption. The analysis of interrupter operation on the load with an active-capacitive component is carried out. **Practical meaning.** The results of the research can be applied in the development of high-voltage SMPG scheme with improved energy-dynamic parameters. Reference 20, figures 10.

Key words: semiconductor-magnetic pulse generator, nanosecond current interrupter, saturable reactor, magnetization curve, numerical simulation.