

kompanii Alutech [Shutters, roller shutters automatic gates, the price of the company Alutech]. Kompaniya Alutesh. Available at: <http://rolstavni-alutech.rolstaven.com/> (accessed 18.11.2016).

14. Prays na okna [Price list for windows]. Predstavitel'stvo kompanii ROTOX v Ukraine. Available at: <http://rotosteklo/plusbs.ua/?act=viewrazdel&razdel=5/> (accessed 01.12.2016).

15. Prays na okonnuyu produktsiyu WDS [Price list for

window products VDS]. Kompaniya Miroplast (WDS). Available at: <http://wds.ua/ru/produktsiya/okonnnye-i-dvernye-sistemy> (accessed 01.12.2016).

16. Prays na okna [Price list for windows]. Kompaniya Veka predstavitel' nemetskoj produktsii URBAN, HOLLINGER. Available at: <http://veka-bc.com/g6605349-steklopakety-okna/092price/> (accessed 18.12.2016).

Поступила (received) 22.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Енергозберігаючий будинок для інженерно-технічного персоналу, що працює в польових умовах / О. Ю. Бондаренко А. С. Купріянов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

Энергосберегающий коттедж для инженерно-технического персонала, работающего в полевых условиях / А. Ю. Бондаренко, А. С. Куприянов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-0740.

Energy saving cottage for engineering personnel working in the field / A. Yu. Bondarenko, A. S. Kupriyanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 17-23. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олександр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Бондаренко Олександр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, НТУ «ХПИ»; тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Bondarenko Aleksandr Yurevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, NTU "KhPI"; tel: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.

Купріянов Антон Сергійович – студент, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua

Куприянов Антон Сергеевич – студент, НТУ «ХПИ»; тел.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua.

Kupriyanov Anton Sergeevich – Student, NTU "KhPI"; tel.: (057)7076245; e-mail: daff@email.ua.

УДК 621.35.035 : 621.365

Л.В. ВАВРІВ, В.М. ІВАНОВ, В.Є. МАРЦЕНЮК, Р.С. МІРЗОЄВ

ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ІМПУЛЬСІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ

Розглянуто основні питання, які вирішуються фізикою і технікою генерації періодичних високовольтних імпульсів мікро-мілісекундного діапазону тривалості. Розглянуті схеми пристроїв, принципи і способи отримання високої напруги можуть бути використані при розробці нових і вдосконаленні електротехнологічних установок різного призначення, але безпосереднє застосування розглянутих схем пристроїв для живлення нових високовольтних електрофізичних установок можливо тільки після вдосконалення таких пристроїв з урахуванням вимог до конкретної електротехнології.

Ключові слова: високовольтний імпульс, ємнісний накопичувач енергії, індуктивний накопичувач енергії, високовольтний генератор імпульсів.

Рассмотрены основные вопросы, решаемые физикой и техникой генерации периодических высоковольтных импульсов микро-миллисекундного диапазона длительностей. Рассмотренные схемы устройств, принципы и способы получения высокого напряжения могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании електротехнологических установок различного назначения, но непосредственное применение рассмотренных схем устройств для питания новых высоковольтных электрофизических установок возможно только после усовершенствования таких устройств с учетом требований к конкретной електротехнологии.

Ключевые слова: высоковольтный импульс, емкостной накопитель энергии, индуктивный накопитель энергии, высоковольтный генератор импульсов.

The main problems solved by physics and technique of generation of periodic high-voltage pulses of a micro-millisecond range of durations are considered. The considered circuits of devices, principles and methods for obtaining high voltage can be used in the development of new and improvement of electrotechnological installations for various purposes, but the direct application of the considered circuits of devices for feeding new high-voltage electrophysical units is possible only after the improvement of such devices, taking into account the requirements for specific electrotechnology.

Keywords: High-voltage pulse, capacitive energy storage, inductive energy storage, high-voltage pulse generator.

Вступ. Розвиток сучасної радіоелектроніки та прикладної фізики призвело до розширення застосування потужних високовольтних квазіпрямокутних імпульсів мікро-мілісекунди тривалості. Потужні електрофізичні і модулюючі імпульси застосовуються в установках термоядерного синтезу, прискорювачах елементарних частинок і найрізноманітніших електрофізичних пристроях для отримання інтенсивних електричних і магнітних полів, генерації ударних хвиль в рідинах, дослідження електричної міцності діелектриків і середовищ і так далі.

Специфіка високих напруг і потужної імпульсної техніки, різко звужує межу і номенклатуру застосовуваної елементної бази і одночасно підвищує технологічні вимоги до вузлів і елементів пристроїв, призводить до важко переборним фізичним, технологічним і економічним перешкодам, часто зупиняє впровадження в практику, здавалося б, працездатних ідей. Ця ж специфіка практично виключає механічне перенесення сучасного найширшого досвіду низьковольтної радіоелектроніки в високовольтну техніку. Тому експериментальний досвід в даній області має особливу цінність.

Проблеми генерації, формування та трансформації потужних коротких імпульсів регулярно обговорюються на щорічних міжнародних симпозиумах в Європі, Азії та США, їх актуальність підтверджується численними щорічними конференціями по прискорювачах елементарних частинок з обов'язковими секціями імпульсно-високовольтної тематики.

Побудова сучасних потужних імпульсних генераторів досить різноманітно і визначається в першу чергу видами і режимами застосовуваних накопичувачів енергії (НЕ) і комутуючих приладів. Різні поєднання накопичувачів і комутаторів при вдалому схемному побудові дають можливість отримувати необхідні параметри вихідних імпульсів [1].

За своєю значимістю з безлічі проблем, що вирішуються фізикою і технікою генерації потужних періодичних високовольтних імпульсів мікро-мілісекундного діапазону тривалості, поряд зі створенням економічних високовольтних комутаторів виділяються:

- створення ефективних формуючих і формуючотрансформуючих ємнісних, індуктивних і індуктивно-ємнісних НЕ, а також пристроїв і ланцюгів пасивної і активної корекції форми коротких імпульсів;
- пошук шляхів скорочення габаритів, ваги та вартості генеруючих пристроїв;
- дослідження підвищувальної і понижувальної трансформації квазіпрямокутних імпульсів насамперед трансформаторами з феро осереддям;
- створення пристроїв, що генерують потужні періодичні квазіпрямокутні імпульси прецизійної форми з особливо крутими фронтами і зрізом і дуже малою нерівномірністю вершини;
- вирішення комплексу задач, пов'язаних зі створенням пристроїв, що генерують потужні і надпотужні по можливості більш короткі періодичні імпульси при індуктивному накопиченні енергії.

Індуктивні накопичувачі багаторазово перевершують ємнісні накопичувачі по питомій енергії, що

запасується, що різко зменшує їх порівняльні габарити, вагу і вартість. Для отримання високовольтних імпульсів за допомогою індуктивних НЕ не потрібні джерела живлення високої напруги. Однак для їх застосування необхідні швидкодіючі високовольтні розмикаючі комутатори періодичної дії з малим внутрішнім опором, розробка яких для високих рівнів потужності досі є невирішеною проблемою.

Широкого застосування індуктивних НЕ слід очікувати лише при впровадженні в область генерації потужних періодичних імпульсів техніки надпровідників, які дозволяють збільшити постійну часу НЕ, а також при істотному прогресі в техніці розривних напівпровідникових комутаторів. Проте параметри сучасних замикаються тиристорів, польових транзисторів і біполярних транзисторів з ізолюваному затвором вже зараз дозволяють ефективно використовувати індуктивні НЕ для генерації з вихідним імпульсним трансформатором високовольтних мікросекундних періодичних імпульсів малої і середньої потужності.

На відміну від індуктивних широко застосовуються ємнісні НЕ. Використовуються як повний, так і частковий режими розряду ємнісних накопичувачів енергії.

Для отримання електрофізичних квазіпрямокутних імпульсів прецизійної форми застосовуються двоключові генератори з частковим розрядом ємнісних НЕ і м'якими комутаторами. Простота зміни тривалості імпульсу є одним з важливих переваг таких генераторів. Використання в якості НЕ накопичувальної ємності або штучної лінії коригованій по фронту тривалості фронту і зрізу вихідних імпульсів визначається часом включення комутаторів. Генерація потужних імпульсів сучасних параметрів неможлива без застосування високовольтних імпульсних трансформаторів (ІТ). Потужні ІТ з феро осереддям широко застосовуються в якості вихідних пристроїв в м'яких генераторах або використовуються для міжкаскадного зв'язку. Отримана форма вихідних імпульсів багато в чому визначається властивостями ІТ, особливо при великому коефіцієнті трансформації. Застосування вихідних підвищуючих ІТ дозволяє різко скоротити габарити, вагу і вартість генеруючих пристроїв [2], хоча і негативно впливає на форму прямокутних імпульсів, збільшуючи відносні тривалості фронту, зрізу і нерівномірність вершини. У зв'язку з цим величина коефіцієнта трансформації K_T сучасних вихідних ІТ при тривалості імпульсів в одиниці і десятки мікросекунд зростає до 10-20 і більше [3].

Принципи формування імпульсів високої напруги або струму. Основним принципом створення імпульсних високовольтних джерел є принцип накопичення електромагнітної енергії в ємнісному (конденсатори з малою індуктивністю і формуючи лінії) або індуктивному накопичувачі з подальшою передачею енергії в навантаження.

Найбільшого поширення набув принцип запасання електричної енергії в ємнісному накопичувачі - конденсаторної батареї. Цей принцип відносно простий: порівняно повільно енергія накопичується в спе-

ціальному пристрої, а потім за допомогою замикаючого комутатора вона швидко передається в навантаження. Таким чином, при малій тривалості імпульсу навіть при невеликих енергіях можна отримати гігантські потужності.

Принцип з використанням індуктивного накопичувача використовується при отриманні високовольтних імпульсів для потужної імпульсної техніки. Щільність енергії, що запасється в індуктивних накопичувачах, на два порядки більше, ніж в ємнісних, а, отже, менше вартість накопичувачів. Імпульсна напруга, що отримують на виході при обриві струму, при цьому може бути значно вище, ніж напруга на попередній стадії формування імпульсу. При цьому слід мати на увазі, що при мегавольтному рівні напруги обірвати струм кілоамперного діапазону значно складніше, ніж швидко замкнути комутатор.

Пристрої для отримання високої напруги. Існують різні пристрої для отримання високої напруги в електротехнологіях згідно принципів накопичення електромагнітної енергії. При розгляді пристроїв наведені їх основні відмінні або характерні ознаки, а також наведені дані по вихідним напруженням, струмім, частоті проходження імпульсів, і які носять узагальнений характер [4-6]. Оскільки форма вихідного сигналу, що отримують пристроями для отримання високої напруги для кожного пристрою індивідуальна і є основним параметром пристроїв, то представлені осцилограми вихідних сигналів мають узагальнений вид. Осцилограми напруги отримані в результаті моделювання електромагнітних процесів за допомогою програм комп'ютерного моделювання LTspice, Electronic Workbench, проведення експериментів або взяті з літературних джерел [7-19].

Схеми джерел високої напруги, що використовують в якості накопичувача енергії ємнісні накопичувачі енергії (конденсатори). Імпульсне джерело напруги, запропоноване В.К. Аркадьєвим і Е.Марксом, складається з системи резистивно-ємнісних ланцюжків і комутуючих (іскрових або напівпровідникових) елементів і його схема зображена на рис. 1. Принцип збільшення (множення) напруги полягає в паралельному заряді накопичувальних елементів (C_1) через зарядні резистори (R_a , R_2) від джерела напруги (E) і з послідовним з'єднанням в розрядний ланцюг за допомогою комутуючих елементів (VS_1) при формуванні імпульсу напруги. При цьому вихідна напруга складається (множить) і залежить від кількості накопичувальних елементів. Напруга $U = n \times U_1$ (U_1 – напруга заряду конденсатора ступені) на виході джерела може досягати значень мегавольтного діапазону при цьому струм до одиниць кілоампер, а частота проходження імпульсів до 10 імпульсів / с [13].

Пристрій для отримання високої напруги на конденсаторах зі змінною величиною ємності ($C_i > C_{i+1}$) складається з системи послідовно включених конденсаторів з різною ємністю, які розділені діодами. Принцип збільшення напруги полягає в наступному: при заряді накопичувальних конденсаторів C від дже-

рела змінної напруги U_1 відбувається передача енергії по послідовному ланцюжку і тим самим поступове підвищення вихідної напруги. Вихідна напруга залежить від відношення максимальної C_{max} величини ємності конденсатора до мінімальної C_{min} величини ємності конденсатора [10]. Граничне значення напруги для даної схем становить 100 кВ, струм 10^{-3} А. Якщо в даній схемі паралельно конденсатору підключити комутатор FV , то при перевищенні напруги на конденсаторі напруги пробою комутатора, відбувається передача енергії в навантаження R_H . Після цього подається нова частина енергії від джерела E і процес повторюється. Частота проходження таких імпульсів невелика і становить 0,1–10 імпульсів/с.

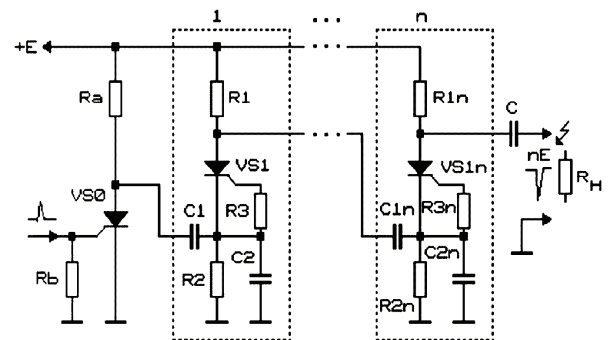


Рисунок 1 – Схема імпульсного джерела напруги Аркадьєва – Маркса на напівпровідникових елементах

Типова форма напруги на виході даного джерела імпульсної напруги показана на рис. 2.

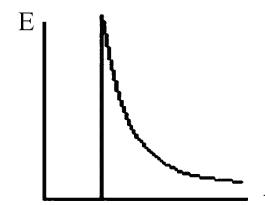


Рисунок 2 – Форма напруги на виході імпульсного джерела напруги Аркадьєва - Маркса на напівпровідникових елементах

Трансформатор Тесла представлений на рис. 3 [13, 20]. Пристрій для отримання високої напруги складається з джерела живлення E і трансформатора T_1 , накопичувального конденсатора C_1 , порогового комутуючого елемента K_1 (може бути, як іскровий розрядник, так і його напівпровідниковий аналог) і підвищує високочастотного високовольтного трансформатора T_2 . Первинна обмотка L_1 трансформатора T_2 , що представляє собою систему двох індуктивно зв'язаних контурів, в момент спрацювання комутуючого елемента виявляється короткочасно підключеною до накопичувального конденсатору C_1 . Навантаженням T_2 служить ємність C_2 , яка підключається до вторинної обмотки L_2 . Форма вихідної напруги, отримана в результаті моделювання на Electronic Workbench, показана на рис. 4.

Генерування високої напруги на навантаженні відбувається оптимальним чином, якщо власні частоти пов'язаних контурів рівні, а, отже, $L_1 C_1 = L_2 C_2$. На-

пруга на C_2 в цьому випадку до спрацьовування ключа K_1 і при відсутності втрат являє собою різницю двох гармонійних коливань [21]

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \left\{ \cos\left[\omega_0 / \sqrt{1-k}\right] t - \cos\left[\omega_0 / \sqrt{1+k}\right] t \right\},$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ – власна частота коливань контурів; $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ – коефіцієнт зв'язку контурів, обумовлений загальним магнітним потоком обмоток.

Повна передача енергії з C_1 (накопичувальної ємності в C_2 відбувається при дискретних значеннях коефіцієнта зв'язку:

$$k = \left(\frac{m}{m-1} \right)^2 - 1 / \left(\frac{m}{m-1} \right)^2 + 1,$$

де m – порядковий номер сплеску для $U_2(t)$, ($m = 1, 2, 3, \dots$).

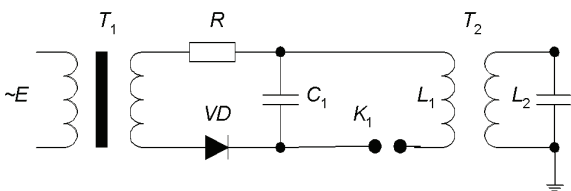


Рисунок 3 – Схема джерела на трансформаторі Тесла

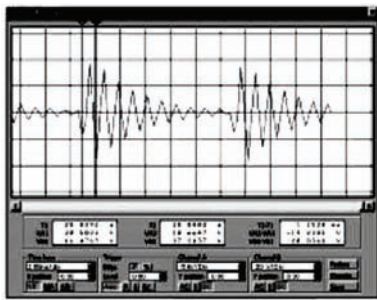


Рисунок 4 – Форма напруги на виході джерела на трансформаторі Тесла

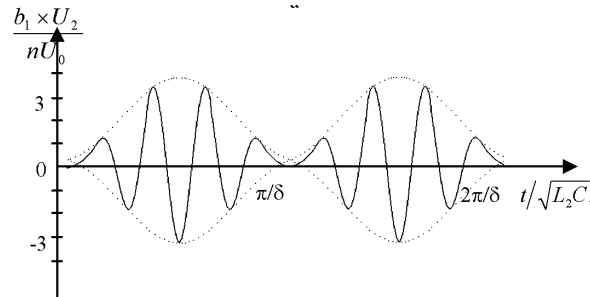
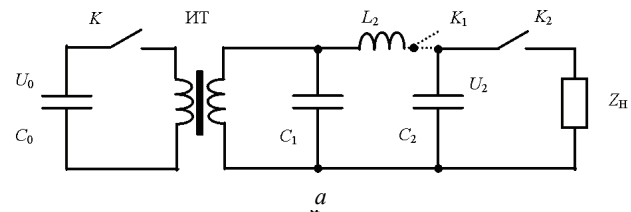
Трансформатори Тесла дуже зручні, компактні і широко використовуються в високовольтній техніці, дозволяючи отримувати коефіцієнти трансформації від 1 до 1000 при одному або декількох витках в первинній обмотці, а вихідні напруги – близько 1 МВ і більше. Крім того, імпульсні трансформатори володіють високим ККД.

Резонансне трансформаторне джерело напруги. Коли напруга на навантаженні перевищує 100 кВ, бажано застосовувати схемні рішення, що забезпечують на виході трансформатора напруги, менші, ніж на навантаженні. Одним з варіантів таких рішень є резонансний трансформаторний джерело напруги [20]. Принципова і еквівалентна схема такого джерела, а також характерного вигляду напруги (биття) на найбільш високовольтній ємності представлені на рис. 5.

Обов'язковою умовою множення напруги на навантаженні Z_H в порівнянні з напругою на високовольтній обмотці ІТ є перевищення ємності проміжного ємнісного накопичувача C_1 над високовольтній вихідній ємністю C_2 .

Принцип дії резонансного джерела напруги поля-

гає в наступному. Попередньо заряджений до напруги U_0 первинний накопичувач C_0 після спрацьовування комутатора K , яким може бути потужний високовольтний транзистор, тиристор або іскровий розрядник, розряджається на первинну обмотку трансформатора ІТ. При цьому у вторинній обмотці ІТ, що навантажена ємністю (в даному варіанті C_1), формується напруга у вигляді різниці гармонійних коливань. Аналогічно протікає процес трансформації і в трансформаторі Тесла. Потім, на відміну від варіанту з трансформатором Тесла, спрацьовує загострюючий комутатор K_1 (може й не бути) і в додатковому контурі $L_2 C_2$ порушуються биття зі сплесками, амплітуди яких наростають в першому напівперіоді биття і спадають в другому.



б

Рисунок 5 – Схеми і характерне напруга на високовольтній ємності резонансного трансформаторного джерела напруги: а – принципова схема; б – характерна напруга на ємності C_2 без спрацьовування ключа K_2

Залежно від настройки на відповідному сплеску спрацьовує ключ K_2 (іскровий розрядник), що перемикає запасену в ємності C_2 і C_1 енергію в навантаження Z_H , на якому ця енергія і виділяється.

Резонансне джерело напруги, незважаючи на наявність в ньому додаткового контуру, має менший обсяг, ніж джерело напруги на імпульсному трансформаторі з безпосередньо підключеним навантаженням – трансформаторі Тесла. Ця різниця в обсягах тим помітніше, чим менше ємність навантаження і вище напруга на C_2 .

Генератори Д'Арсонваля включають до складу низькочастотний підвищувальний трансформатор, з підключеним комутатором паралельно підвищувальній обмотці трансформатора (див. рис. 6). Паралельно комутатору F у вторинному ланцюзі підключено послідовно ланцюг, що складається з послідовного з'єднання конденсаторів C , що накопичують енергію, і первинної обмотки підвищувального трансформатора L (високо частотного автотрансформатора). Після спрацьовування комутатора F накопичувачі C розряджаються на первинну обмотку L підвищувального трансформатора. Форма напруги на виході цього при-

строю показана на рис. 7. Граничні параметри по напрузі 100 кВ, струм 10^{-3} А, частота проходження вихідних імпульсів 15-500 кГц.

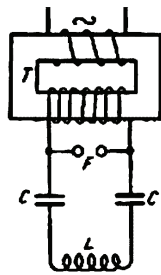


Рисунок 6 – Схема генератора Д'Арсонваля

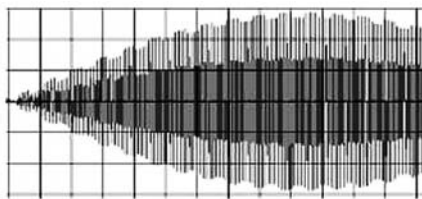


Рисунок 7 – Форма напруги на виході генератора Д'Арсонваля

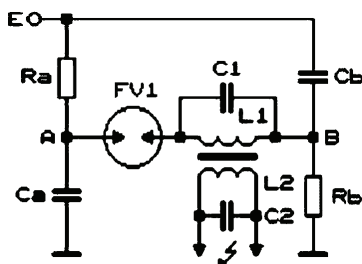


Рисунок 8 – Мостова схема отримання високої напруги

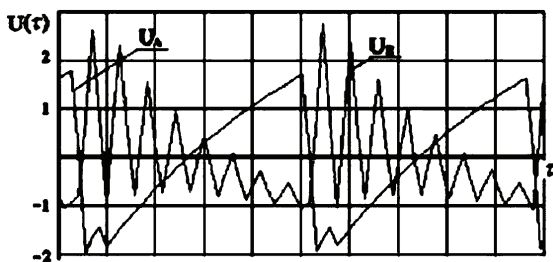


Рисунок 9 – Форма напруги мостової схеми отримання високої напруги

Мостові пристрої отримання високої напруги (рис. 8) до складу яких входить джерело напруги E , несиметрична резистивно-конденсаторна мостова схема і підвищувальний трансформатор з навантаженням. Діагональ складається з послідовно включеного комутатора FV_1 і обмотки підвищувального трансформатора L_1 . На конденсаторах, з запасється енергією, цього пристрою відбувається більш плавне наростання напруги. Граничні значення по напрузі десятки кіловольт, по току одиниці ампер, частота до ста кілогерц. Форма напруги на виході пристрою показана на рис. 9.

Пристрій з множенням напруги в первинному ланцюзі (див. рис. 10) включає в себе резистивно-емнісний ланцюг задаючих час елементів ($R_1, C_1, C_2,$

C_3, VD_1 або R_2) і комутуючого елемента FV_1 (іскрового розрядника), вихідний трансформатор L_1, L_2 і навантаження C_4 . Після спрацьовування комутатора FV_1 до обмотці L_1 високочастотного трансформатора прикладається подвоєне (потроєне) напруга. Форма вихідної напруги показана на рис. 11. Граничні значення по напрузі десятки кіловольт, по току одиниці ампер, частота до 100 кГц.

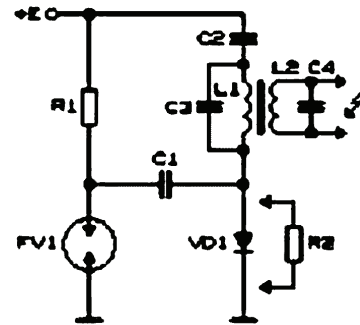


Рисунок 10 – Схема з множенням напруги в первинному ланцюзі

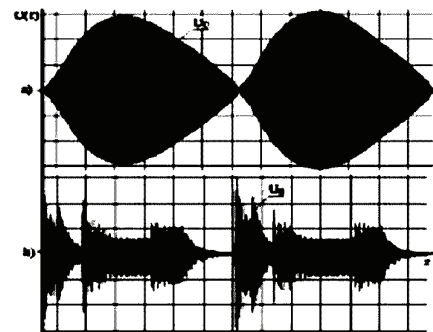


Рисунок 11 – Форма вихідної напруги схеми з множенням напруги в первинному ланцюзі

Джерела напруги, що використовують в якості накопичувача енергії індуктивні накопичувачі. Принцип роботи цього пристрою наступний. В результаті переривання протікає через індуктивність струму, при збереженій в індуктивності енергії, відбувається зміна напруги на висновках індуктивного накопичувача. Однак, у зв'язку з технічними труднощами (низькі частоти управління індуктивністю, підвищені вимоги до ізоляції індуктивності і т.д.) такі пристрої реалізуються рідко.

Пристрій з індуктивними накопичувачами $L_1 - L_6$ з використанням вибухають провідників $R_1 - R_3$ і комутаторами $FV_1 - FV_3$ наведено на рис. 12. Такі пристрої на індуктивностях можуть бути виконані за аналогією з пристроями на комутованих конденсаторах з урахуванням індивідуальних особливостей роботи індуктивностей L як накопичувачів енергії. Форма вихідної напруги має вигляд представлений на рис. 2. Граничні параметри по напрузі до 2000 кВ, струму 200 А.

Пристрій для отримання високої напруги (див. рис. 13) містить котушку індуктивності в якості накопичувача енергії для отримання напруги складається з джерела напруги U , струмообмежувального резистора R послідовно включеного з котушкою і комутуючого

елемента K_1K_2 . Форма його вихідної напруги показана на рис. 14.

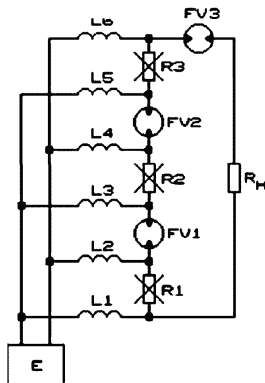


Рисунок 12 – Схема джерела високої напруги на індуктивних накопичувачах з використанням вибухають провідників

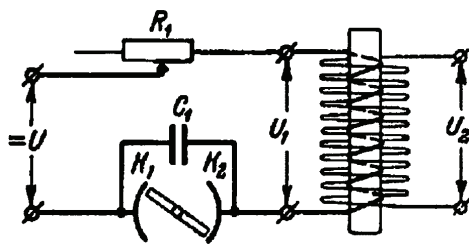


Рисунок 13 – Схема отримання високої напруги з котушкою індуктивності в якості накопичувача енергії

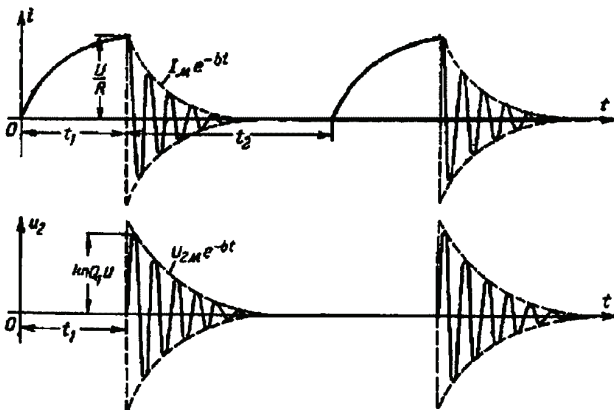


Рисунок 14 – Форма вихідного струму і напруги на котушці індуктивності

Накопичувачем може виступати або котушка індуктивності (індуктор) або первинна обмотка трансформатора (або автотрансформатор) паралельно з яким може включатися ємність або діод для обмеження коливального процесу. Управлінням замиканням і розмиканням комутатора (напівпровідникового чи іншого комутуючого елемента) на виході пристрою формується імпульси напруги, які затухають в часі.

Такі пристрої дозволяють отримувати високу напругу на виході при низькому (десятки вольт) напругі на вході.

Пристрій, що показано на рис. 15, складається з n -відривків коаксіальних кабелів, з'єднаних на вході своїми кінцями паралельно, а на виході - послідовно [13] являє собою імпульсний трансформатор з відривків коаксіальних високовольтних кабелів однакової

довжини. Якщо подати на таке пристрою імпульс напруги амплітудою U від джерела E_2 , то на навантаженні Z_n вхідний імпульс трансформується в імпульс з амплітудою nU , де n – число відривків коаксіального кабелю імпульсного трансформатора. Форма імпульсу напруги має вигляд, що показано на рис. 2.

Пристрої для отримання високої напруги з індуктивно-ємнісним комбінованим способом отримання високої напруги.

У пристрою ударного збудження періодично джерело напруги E через комутатор під'єднується до коливального контуру, що складається з накопичувача C і первинної обмотки трансформатора T . Зарядний струм накопичувача C регулюється резистором R . При цьому на виході пристрою формуються затухаючі імпульси з високочастотним заповненням, що визначаються властивостями резонансного контуру. За допомогою такого пристрою можна отримувати імпульси амплітудою напруги десятки кіловольт, струму одиниць ампер і частоту імпульсу до 10000 кГц.

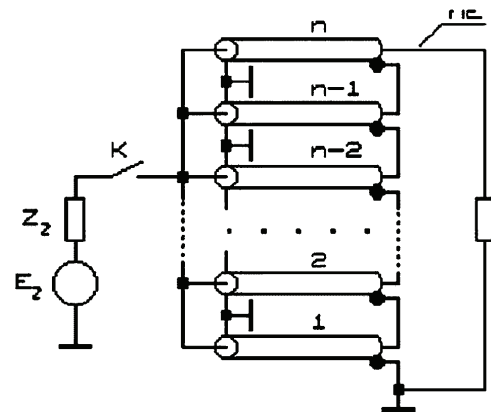


Рисунок 15 – Схема отримання високої напруги за допомогою відривків коаксіальних кабелів

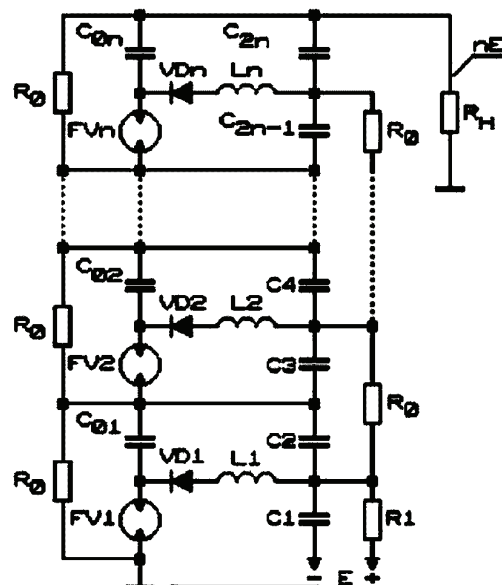


Рисунок 16 – Схема генератора Аркадієва - Маркса с індуктивно-ємнісним накопичувачем

Як пристрій (див. рис. 16) з індуктивно-ємнісним накопичувачем можна використовувати генератор

Аркадьєва - Маркса, якщо для підвищення напруги використовувати закони перехідних процесів в LC контурах для перезарядки, попередньо заряджених через резистор R , накопичувальних ємностей C через індуктивність L . Після спрацювання розрядних комутаторів FV здійснюється підсумовування напруг на виході пристрою. Форма напруги на виході пристрою має вигляд що показано на рис. 2.

Висновки. По кожному з порушених у пропонованій роботі аспектів генерації потужних високовольтних імпульсів до теперішнього часу опубліковано безліч інших неказаних статей і монографій. З різних причин неможливо охопити в даній статті хоча б більшу їх частину. Багато робіт мають закритий характер. Все ж представляється можливим зробити загальний висновок, що до сих пір широко використовуються лише традиційні побудови генеруючих пристроїв, незважаючи на підвищення вимог до їх параметрами, але при цьому зростають масштаби їх використання і, відповідно, вартість. Тому слід очікувати значного розширення наукового пошуку принципово нових видів генераторів потужних періодичних імпульсів, як з ємнісним, так і особливо з індуктивним нагромадженням енергії.

Список літератури:

1. *Каштанов В.В.* Генерация мощных электрических импульсов / *В.В. Каштанов, А.В. Сапрыгин* // Теоретическая физика. – 2007. – № 8. – С.188-200.
2. *Каштанов В.В.* Возможности снижения массы и габаритов мощных микро-миллисекундных импульсных модуляторов / *В.В. Каштанов, А.В. Сапрыгин* // Вопросы прикладной физики. – 1997. – Т. 3. – С. 75-78.
3. *Gamp A. / A. Gamp* // Particle Accelerator Conference (PAC-97), Vancouver, Canada. – 1997. – Режим доступу: <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
4. *Шустов М.А.* Электроразрядная фотография / *М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич.* – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1999. – 244 с.
5. *Шустов М.А.* Теория и практика газоразрядной фотографии / *М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич.* – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2001. – 252 с.
6. *Шустов М.А.* Практическая схемотехника. Преобразователи напряжения. Кн.3. / *М.А. Шустов.* – М.: Altex, 2002. – 190 с.
7. *Bouwers Dr.A.* Elekfrische Hichsfspannungen / *Dr.A. Bouwers.* – Berlin: Verlag von Julius Springer, 1939. – 334 p.
8. *Воробьев А.А.* Техника высоких напряжений / *А.А. Воробьев.* – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1945. – 520 с.
9. *Воробьев А.А.* Высоковольтное испытательное оборудование и измерения / *А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Н.И. Воробьев, А.Ф. Калганов* и др. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 584 с.
10. *Фрюнгель Ф.* Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов / *Ф. Фрюнгель.* – М.-Л.: Энергия, 1965. – 488 с.
11. *Криштафович И.А.* Транзисторные системы высоковольтного электропитания / *И.А. Криштафович.* – К.: Препринт, 1988. – 55 с. (Институт электродинамики АН УССР, № 584).
12. Патент Швейцария. МКИ H02M 7/04. Бестрансформаторная схема источника питания. – №658960. Оpubл. 15.12.1986.
13. *Кремнев В.В.* Методы умножения и трансформации

импульсов в силовоточной электронике / *В.В. Кремнев, Г.А. Месяц.* – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1987. – 226 с.

14. *Месяц Г.А.* Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения / *Г.А. Месяц, А.С. Насибов, В.В. Кремнев.* – М.: Энергия, 1970. – 152 с.

15. *Велихов Е.П.* Физика и техника мощных импульсных систем / *Е.П. Велихов.* – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

16. *Ситайлов Г.А.* Генераторы ударной мощности / *Г.А. Ситайлов, К.А. Хорьков.* – М.: Энергия, 1979. – 127 с.

17. *Смирнов С.М.* Генераторы импульсов высокого напряжения / *С.М. Смирнов, П.В. Терентьев.* – М.-Л.: Энергия, 1964. – 239 с.

18. *Носов Г.В.* Разработка и численный анализ импульсных генераторов с периодически изменяющейся индуктивностью. Дисс. на соиск. уч. степ... канд. физ.-мат. наук. – Томск. политехн. ин-т, 1985. – 150 с.

19. *Борискин А.С.* Высоковольтный источник напряжения на базе магнитокумулятивного генератора типа ВМГ-80 / *А.С. Борискин, Е.М. Димант, В.Д. Селемир, А.А. Соловьев* // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 8-15.

20. *Желтов К.А.* Пикосекундные силовоточные электронные ускорители / *К.А. Желтов.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 120 с.

21. *Абрамян Е.А.* Интенсивные электронные пучки. Физика, техника, применение / *Е.А. Абрамян, Б.А. Альтеркоп, Г.Д. Кулешов.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.

References (transliterated)

1. *Kashtanov V.V., Saprygin A.V.* Generacija moshhnyh jelektricheskikh impul'sov [Generation of powerful electric pulses]. *Teoreticheskaja fizika*. 2007. No 8. PP.188-200.
2. *Kashtanov V.V., Saprygin A.V.* Vozmozhnosti snizhenija massy i gabaritov moshhnyh mikro-milisekundnyh impul'snyh moduljatorov [Possibilities to reduce the mass and dimensions of powerful micro]. *Voprosy prikladnoj fiziki*. 1997. Vol. 3. PP. 75-78.
3. *Gamp A.* Particle Accelerator Conference (PAC-97), Vancouver, Canada. 1997. <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
3. *Gamp A., Schiitt P., Weiland T., Fuhai Lu* Feasibility Study of a HOM IOT for TESLA. *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (PAC-97)*, Vancouver, Canada. 1997. PP. 3162-3168 <http://www.triumf.ca/pac97/papers/index.html>
4. *Shustov M.A., Protasevich E.T.* Jelektrorazrjadnaja fotografija [Electric discharge photography]. *Tomsk: Izd-vo Tomsk. politehn. un-ta*, 1999. 244 p.
5. *Shustov M.A., Protasevich E.T.* Teorija i praktika gazorazrjadnoj fotografii [Theory and practice of gas-discharge photography]. *Tomsk: Izd-vo Tomsk. politehn. un-ta*, 2001. 252 p.
6. *Shustov M.A.* Prakticheskaja shemotehnika. Preobrazovatel'i naprjazhenija. Kn. 3. [Practical circuitry. Voltage converters. Vol. 3]. *Moscow: Altex*, 2002. 190 p.
7. *Bouwers Dr.A.* Elekfrische Hichsfspannungen. *Berlin: Verlag von Julius Springer*, 1939. 334 p.
8. *Vorob'ev A.A.* Tehnika vysokih naprjazhenij [Technique of high stresses]. *Moscow-Leningrad: Gosjenergoizdat*, 1945. 520 p.
9. *Vorob'ev A.A., Vorob'ev G.A., Vorob'ev N.I., Kalganov A.F.* and others. Vysokovol'tnoe ispytatel'noe oborudovanie i izmerenija [High voltage test equipment and measurements]. *Moscow-Leningrad: Gosjenergoizdat*, 1960. 584 p.
10. *Frjungeľ F.* Impul'snaja tehnika. Generirovanie i primenenie razrjadov kondensatorov [Impulse Technology. Generation and application of discharges of capacitors]. *Moscow-Leningrad: Jenergija*, 1965. 488 p.
11. *Krishtafovich I.A.* Tranzistornye sistemy vysokovol't-

nogo jelektropitanija [Transistor systems of high-voltage power supply]. Kiev: Preprint, 1988. 55 p. (Institut jelektrodinamiki AN USSR, No 584).

12. Patent Shvejcarija. MKI H02M 7/04. Bestransformatornaja shema istochnika pitanija. [Transformerless power supply circuit]. No 658960. Opubl. 15.12.1986.

13. Kremnev V.V., Mesjac G.A. Metody umnozhenija i transformacii impul'sov v sil'notochnoj jelektronike [Methods of multiplication and transformation of pulses in high-current electronics]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-e, 1987. 226 p.

14. Mesjac G.A., Nasibov A.S., Kremnev V.V. Formirovanie nanosekundnyh impul'sov vysokogo naprjazhenija [Formation of nanosecond high-voltage pulses]. Moscow: Jenergija. 1970. 152 p.

15. Velihov E.P. Fizika i tehnika moshhnyh impul'snyh sistem [Physics and technology of powerful impulse systems]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1987. 352 p.

16. Sipajlov G.A., Hor'kov K.A. Generatory udarnoju moshhnosti [Shock power generators]. Moscow: Jenergija, 1979. 127 p.

17. Smirnov S.M., Terent'ev P.V. Generatory impul'sov

vysokogo naprjazhenija [High voltage pulse generators]. Moscow-Leningrad: Jenergija, 1964. – 239 s.

18. Nosov G.V. Razrabotka i chislennyj analiz impul'snyh generatorov s periodicheski izmenjajushhejsja induktivnost'ju. [Development and numerical analysis of pulse generators with periodically varying inductance] Diss. na soisk. uch. step... kand. fiziko-mat. nauk. – Tomsk: Tomsk. politehn. in-t, 1985. 150 p.

19. Boriskin A.S., Dimant E.M., Selemir V.D., Solov'ev A.A. Vysokovol'tnyj istochnik naprjazhenija na baze magnitokumuljativnogo generatora tipa VMG-80 [High voltage voltage source based on a magnetocumulative generator of the VMG-80]. Jelektrichestvo. 2001. No 3. PP. 8-15.

20. Zheltov K.A. Pikosekundnye sil'notochnye jelektronnye uskoriteli [Picosecond high-current electron accelerators]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991. 120 p.

21. Abramjan E.A., Al'terkop B.A., Kuleshov G.D. Intensivnye jelektronnye puchki. Fizika, tehnika, primenenie [Intensive electron beams. Physics, technology, application]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1984. 232 p.

Надійшла (received) 05.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пристрої для отримання імпульсів високої напруги в електротехнології / Л.В. Ваврів, В.М. Іванов, В.С. Марценюк, Р.С. Мірзоєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Устройства для получения импульсов высокого напряжения в электротехнологиях / Л.В. Ваврив, В. М. Иванов, В.Е. Марценюк, Р.С. Мерзоев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Devices for obtaining high voltage pulses in electrotechnologies / L.V.Vavriv, V. M. Ivanov, V.E.Martsenyuk, R.S. Merzoev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 23-30. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ваврів Людмила Владиславівна, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-63-09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Ваврив Людмила Владиславівна, кандидат фізико-математических наук, старший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707 63 09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Vavriv Ludmila Vladislavovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Research Institute of Lightning, NTU "KhPI"; tel: (057) 707 63 09; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Іванов Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Іванов Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Ivanov Vladimir Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of RDI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (057) 707-61-83; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Марценюк Валентина Євгенівна, ст. викладач кафедри ІЕФ НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Марценюк Валентина Евгеньевна, ст. преподаватель кафедры ИЭФ НТУ "ХПИ", г. Харьков; тел.: (057) 707-60-52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Martsenyuk Valentina Evgenievna, senior lecturer of the department of IEF NTU "KPI"; Tel.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Мірзоєв Рустам Сідікович, студент кафедри ІЕФ НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-60-52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Мирзоев Рустам Сидикович, студент кафедры ИЭФ НТУ «ХПИ»; тел.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Mirzoev Rustam Sidikovich, student of the department IEF of NTU "KPI"; tel.: (057) 707 60 52; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua