

УДК 629.78+550.388.1

## Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях: особливості

М. А. Леонов

Київський Національний університет імені Тараса Шевченка

*Надійшла до редакції 22.05.96.*

---

Описані два варіанти схеми прискорювача та відмінності між ними. Окреслюються деякі найбільш суттєві особливості системи живлення та елементів прискорювача електронів на ємнісних накопичувачах, узагальнені на основі результатів лабораторних та ракетних експериментів. Коротко розглянуто типові режими роботи.

---

### 1. ВСТУП

Особлива увага до прискорювача електронів на накопичувачах-ємностях (Куклинский, 1983; Мангадзе, 1983; Балебанов, 1983; Managadze, 1988) зумовлена тим, що такий прискорювач здатний відповідати принципам енерго- та ресурсозберігаючих технологій. Сенс застосування ємнісного накопичувача в цьому прискорювачі полягає в створенні можливості інжектувати потужні імпульси електронних пучків при обмежених бортових енергоресурсах або при економічному їх використанні. А сенс застосування лампи у високовольтному колі живлення електронної гармати — в регулюванні струму інжекції та створенні потрібної форми інжектваного імпульсу, а також в обмеженні струму у випадку короткого замикання в гарматі. Схема прискорювача з діодною гарматою, основні співвідношення, що лежать в основі розрахунку прискорювача цього типу, детально описані в роботі Леонова (1996).

Стаття торкається деяких важливих особливостей системи живлення та окремих елементів прискорювача електронів на ємнісних накопичувачах.

Одним із важливих питань з точки зору максимального використання можливостей системи є питання про режим роботи прискорювача.

В статті окреслені три типові випадки, які можуть проявитись в процесі приєднання діодної гармати до системи її живлення і які можуть бути основою для вибору оптимального режиму його роботи. Оптимальним режимом роботи можна вважати такий, при якому прискорювач може мати найкращі питомі характеристики на одиницю маси та об'єму прискорювача.

Підготовка прискорювача для ракетного експерименту Г60С проводилась на основі міркувань, що описуються в статті.

### 2. ВАРІАНТИ СХЕМ ПРИСКОРЮВАЧА

Виконати схему прискорювача можна за двома варіантами (рис. 1), які відрізняються місцями під'єднання лампи Л і накопичувача ЄН. Високовольтний зарядний пристрій, який постійно заряджає ємнісний накопичувач ЄН, а також інші елементи прискорювача на рисунку не показані. Відмінності характеристик прискорювачів, виконаних за цими варіантами, можуть бути суттєвими для фізики експерименту.

Ємнісний накопичувач ЄН може мати більш помітні, ніж лампа Л, струми стікання через діелектрик. Враховуючи еквівалентну схему ємніс-

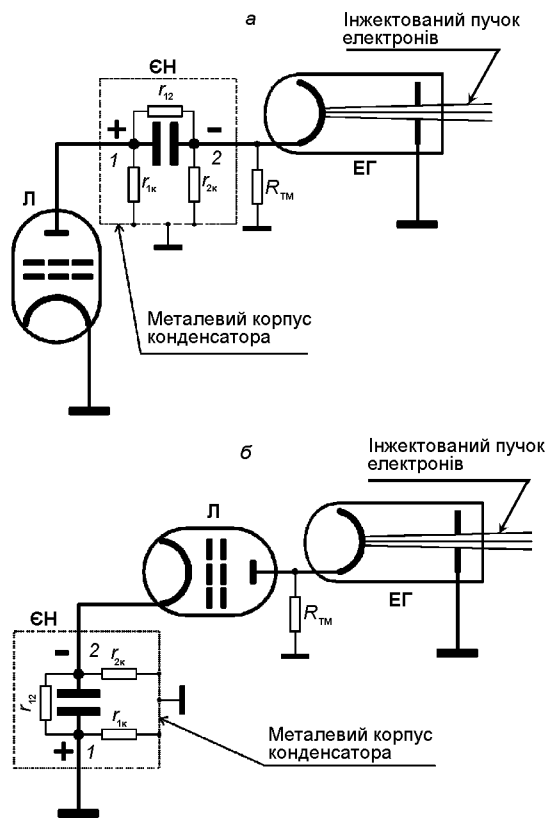


Рис. 1. Варіанти принципової схеми прискорювача на ємнісних накопичувачах. Л — регулююча лампа, ЕГ — електронна гармата. ЄН — ємнісний накопичувач, зображений з його виводами 1, 2 та еквівалентною схемою:  $r_{12}$ ,  $r_{1к}$ ,  $r_{2к}$  — еквівалентний опір саморозряду між обкладками 1 та 2, 1 та корпусом ЄН, 2 та корпусом ЄН відповідно. Високовольтний зарядний пристрій ВВЗП для заряду ємнісного накопичувача ЄН та інші елементи на рисунку не показані

ного накопичувача (як правило, в металевому корпусі), можна бачити, що в залежності від варіанту схеми буде можливий струм стікання не тільки між обкладками 1 і 2 через еквівалентний опір  $r_{12}$ , але й на «загальну землю» (корпус ракети чи супутника) через  $r_{1к}$ , або  $r_{2к}$  і металевий корпус накопичувача. Резистори високовольтних дільників  $R_{ТМ}$  (наприклад, для телеметричного контролю прискорюючої напруги, фокусування пучка і т. п.), приєднані до катода гармати, можуть дещо зменшити величину небажаної напруги на гарматі.

В обох варіантах схеми прискорювача струми стікання приводять до різних наслідків, важливих з точки зору фізика-експериментатора.

В першому варіанті (рис. 1, а) еквівалентний опір для струмів стікання через діелектрик конденсатора здатний замикати високовольтне коло розряду накопичувача ЄН, обминаючи лампу Л, через

корпус накопичувача ЄН на корпус ракети чи супутника. Отже, на гарматі може бути деяка прискорююча напруга, яка визначається співвідношенням величин еквівалентних опорів  $r_{12}$ ,  $r_{1к}$ ,  $r_{2к}$  для струмів стікання накопичувача та еквівалентним опором  $R_{ТМ}$ . Це приводить до можливості постійної, тобто неперервної некерованої інжекції слабого струму при повністю закритій лампі в паузах між запланованими імпульсами інжекції. Наприклад, в експерименті Г60С при напругах на накопичувачі порядку 6—7 кВ орієнтовна величина цього небажаного струму інжекції могла сягати 100 мкА з енергіями електронного пучка менше 5 еВ. (Прискорювач мав діодну гармату, а накопичувачем був конденсатор типу К-41И-7 ємністю 100 мкФ з робочою напругою 5 кВ).

У другому варіанті (рис. 1, б) вказані струми стікання не відіграють такої ролі, оскільки високовольтне коло розряду накопичувача ЄН розірване закритою лампою Л. Струми ж стікання через саму лампу та джерела її живлення в більшості випадків можна зробити набагато меншими, ніж струми стікання в накопичувачі, шляхом належної ізоляції. Крім того, еквівалентні опори струмів стікання (на корпус) лампи та джерел її живлення будуть сприяти зменшенню напруги на гарматі, зумовленої струмами саморозряду накопичувача. Тому в другому варіанті схеми можна при повністю закритій лампі виключити небажану постійну інжекцію слабого струму, зумовлену струмами стікання ємнісного накопичувача, в паузах між запланованими імпульсами інжекції.

Перевага тому чи іншому варіанту схеми, очевидно, може бути надана в залежності від жорсткості вимог до інжекції, від того, який елемент — накопичувач чи лампа — має більші струми стікання, а також від співвідношення мас та об'ємів тих елементів (накопичувача і лампи), які потрібно ізолювати від «загальної землі».

### 3. ОСОБЛИВІ УМОВИ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ

Типовими відхиленнями від нормальної роботи прискорювача є одиночні високовольтні пробої та газовий розряд в проміжку «анод — катод» гармати. Це відбувається при погіршенні вакууму або при появі великого зворотного іонного струму, який каналізується всередині інжектваного електронного пучка в бік гармати. Для системи живлення гармати все це по суті еквівалентне короткому замиканню в гарматі. Як наслідок — вся потужність падає на лампу.

Інша із особливостей роботи, яка притаманна

цьому типу прискорювача, викликається появою змінної складової струму у високовольтному колі живлення електронної гармати. Це може відбуватись як при нормальній інжекції в разі потреби інжектувати модульований імпульс чи пачки імпульсів, так і при відхиленнях від нормальної інжекції, тобто при пробоях або газовому розряді у проміжку «анод — катод» гармати.

Змінна складова струму з високовольтного кола здатна передаватись через паразитні реактивні зв'язки індуктивного або ємнісного типу на блоки, гальванічно зв'язані з високовольтним колом, — тобто, на високовольтний зарядний пристрій, на лампу та на джерело нагрівання катода гармати (особливо якщо застосовано катод прямого розжарення). Вихідні каскади цих блоків можуть виходити з ладу, якщо амплітуда змінної складової, яка поступає на ці каскади, перевищить допустиму межу. Захист вихідних каскадів здійснити неважко (наприклад, за допомогою дроселів).

Зрозуміло також, що загальна «земля» високовольтного кола живлення електронної гармати повинна приєднуватись до корпусу апарата тільки в одній точці, щоб запобігти виходу з ладу іншої апаратури.

#### 4. СПЕЦИФІКА ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ

Зробимо простий перелік деяких загальних вимог до елементів прискорювача, підкресливши їх особливості.

**Високовольтний ємнісний накопичувач.** Оскільки інжекція може здійснюватись короткими і, особливо, модульованими імпульсами, або пачками імпульсів, то конденсатор, що використовується в ролі ємнісного накопичувача ЄН, повинен бути імпульсного типу.

Величину ємності конденсатора, яка значною мірою залежить від параметрів імпульсу інжекції, можна оцінити згідно з роботою Леонова (1996).

Конденсатор повинен мати малі струми саморозряду, або струми стікання через діелектрик між обкладками та на корпус, як про це можна зробити висновок згідно з розд. 2.

Взагалі вимога на величину струмів саморозряду не є дуже жорсткою. Але при великих струмах саморозряду будуть збільшуватися й загальні втрати потужності в прискорювачі, що буде вести за собою збільшення енергоспоживання, маси та об'єму всього прискорювача і, отже, буде нівелювати переваги цього типу прискорювача.

Конденсатор повинен мати достатню максимальну робочу напругу  $U_{\text{ЄНmax}}$ , причому

$$U_{\text{ЄНmax}} \geq U_{\text{ЄН}} + \Delta U_{\text{ЄН}},$$

де  $U_{\text{ЄН}}$  — задана максимальна прискорююча напруга на електронній гарматі, що згідно з циклограмою інжекції необхідна для одержання імпульсу з максимальною енергією,  $\Delta U_{\text{ЄН}}$  — максимальна амплітуда пульсацій на регулюючій лампі, яка необхідна для формування імпульсу з максимальною енергією (Леонов, 1996).

Слід зазначити, що в короточасних ракетних експериментах є сенс в максимальному форсованому використанні всіх можливостей конденсатора, який працюватиме накопичувачем ЄН. Оскільки паспортна випробувальна напруга конденсатора завжди більша від паспортної максимальної робочої, то доцільно застосовувати прискорюючу напругу на накопичувачі в інтервалі вище паспортної максимальної робочої і до випробувальної.

**Високовольтний зарядний пристрій.** Через високовольтний зарядний пристрій (ВВЗП) від бортових батарей каналізується вся енергія, яка потім накопичується у високовольтному конденсаторі ЄН для прискорення електронного пучка. Тому коефіцієнт корисної дії ВВЗП та інші його характеристики великою мірою впливають на характеристики прискорювача в цілому.

Вихідну потужність ВВЗП, яка необхідна для інжекції електронних пучків з конкретними параметрами, легко оцінити (Леонов, 1996).

По відношенню до ВВЗП в цілому як до елемента, інтегрованого в єдину систему — в прискорювач, може бути важливим питання про вигляд функціональної залежності максимальної вихідної потужності ВВЗП від напруги на накопичувачі, тобто залежності

$$P_{\text{ВВЗПвих}} = f(U_{\text{ЄН}}). \quad (1)$$

Вигляд цієї функціональної залежності може впливати не тільки на загальні характеристики, але й на швидкість відновлення нормальної робочої напруги ємнісного накопичувача після її падіння при пробоях або газовому розряді в гарматі.

Якщо прискорювач працює в оптимальному або близькому до нього режимі (див. розд. 6), то навіть при короткому замиканні в гарматі не може бути глибокого розряду накопичувача. Лампа в будь-якому випадку повинна забезпечити стабільний струм розряду  $I_{\text{кз}}$ , який не може бути набагато більшим, ніж максимальний струм інжекції  $I_{\text{bmax}}$ . Тобто, напруга на накопичувачі протягом всього експерименту навіть при короткому замиканні в гарматі не буде дуже відрізнятись від середньої робочої  $\bar{U}_{\text{ЄН}}$  в бік низьких значень (рис. 2).

Тому ВВЗП повинен розвивати максимальну по-

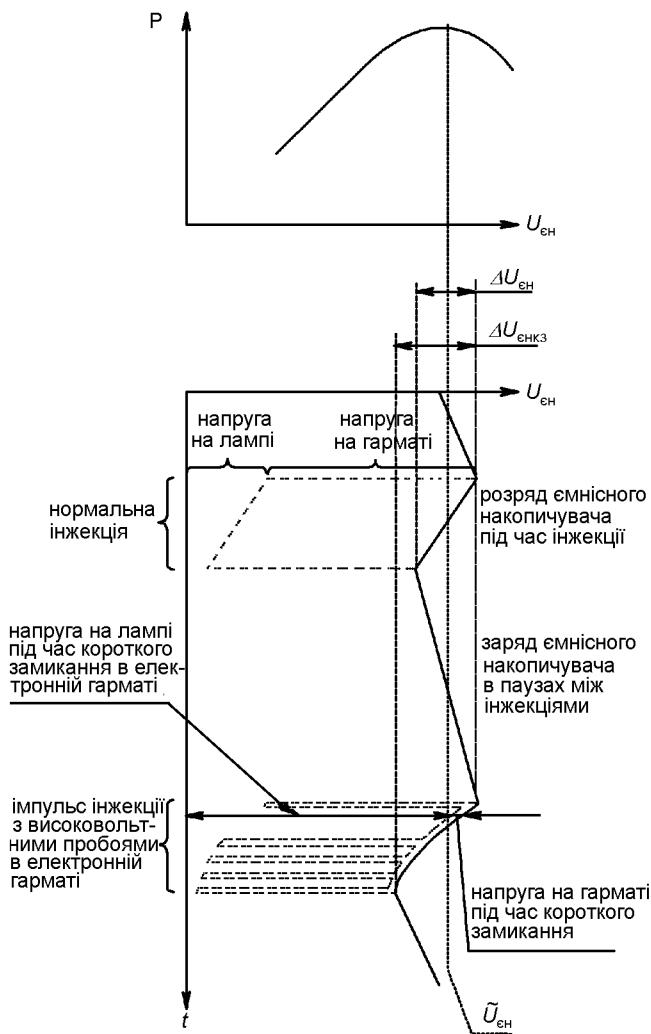


Рис. 2. Видяк залежності вихідної потужності  $P_{\text{ВВЗП}}$  від напруги  $U_{\text{ен}}$  на ємнісному накопичувачі;  $\Delta U_{\text{ен}}$  — інтервал коливань напруги на ємнісному накопичувачі при нормальній інжекції,  $\Delta U_{\text{енкз}}$  — інтервал коливань напруги при короткому замиканні в електронній гарматі

тужність саме поблизу середнього робочого рівня високої напруги.

**Регулююча лампа.** Прискорювач електронів на ємнісних накопичувачах побудований на тому, що лампа повинна:

- комутувати, коли потрібно, високовольтне коло так, як це робить простий ключ, на якому в повністю відкритому стані витрачається мінімальна потужність;
- регулювати струм, який проходить через електронну гармату, коли це необхідно для створення заданої форми імпульса інжекції;
- в екстремних випадках обмежувати максималь-

ний струм, який може протікати у високовольтному колі.

Все це виконувати найзручніше, коли лампа має пентодні вольт-амперні характеристики. Тоді лампа автоматично стає стабілізатором струму у високовольтному колі прискорювача під час короткого замикання в гарматі.

Для того щоб форма будь-якого інжектваного імпульсу не спотворювалась, лампа не повинна обмежувати спектр імпульсу. Тобто, вона повинна бути високочастотною.

Необхідні гранично допустимі електричні параметри лампи легко визначити, аналізуючи схему прискорювача та використовуючи роботу Леонова (1997). Очевидно, що не повинні перевищуватись межі допустимої потужності, які лампа здатна розсіювати на аноді неперервно та в імпульсі як під час інжекції, так і під час короткого замикання в гарматі.

### 5. ЗАГАЛЬНІ ВИТРАТИ ПОТУЖНОСТІ

Досягнення високої економічності прискорювача спирається на аналіз витрат потужності в його елементах.

Ілюструвати загальні витрати потужності в прискорювачі з діодною гарматою можна на прикладі лабораторних та ракетних експериментів, таких як «Стереотоп», «Слой» і Г60С (Куклинский, 1983; Sagdeev, 1983). Можна виділити такі основні групи втрат.

1) Втрати потужності в діодній гарматі, утворені струмом її анода, а також нагрівом її катода. Даремні втрати через струм анода гармати залежать від її конструкції й можуть досягати 20—30 % потужності, що інжектуються. Ці втрати можна суттєво знизити, змінюючи електронно-оптичну систему гармати. (Неминучі втрати на нагрівання катода гармати залежать від конструкції катодного вузла та від способу підігрівання катода: в експерименті Г60С вони не перевищували 100 Вт).

2) Втрати у високовольтному зарядному пристрої, які залежать від його принципової схеми, а також від компонентної бази, від технології виготовлення високовольтного трансформатора тощо.

3) Втрати потужності на аноді лампи і в блоках її живлення (миттєва потужність на аноді лампи при інжекції трикутного імпульсу в експерименті Г60С досягала 25 % потужності у високовольтному колі, а розжарення катода лампи вимагало 36 Вт).

4) Втрати через струми стікання через діелектрик у ємнісному накопичувачі (наприклад, для

серійного конденсатора К-41И-7 в експерименті Г60С струми стікання могли сягати 1 мА при 6.0—7.0 кВ, що наближалось до 2 % вихідної потужності ВВЗП).

5) Втрати в електроніці керування та контролю — у схемах формування циклограми інжекції, високовольтних резисторних дільників напруги для схем телеметричного контролю та електромагнітного фокусування інжектваного пучка тощо.

З усіх перерахованих вище втрат найбільший вклад в загальні неминучі втрати в прискорювачі здатні давати втрати на аноді лампи, втрати через наявність струму анода гармати, втрати у ВВЗП та втрати в діелектрику ємнісного накопичувача.

Загальний виграш по потужності споживання всього прискорювача від бортової енергомережі в порівнянні з потужністю споживання прискорювача прямого живлення (Paton, 1978) великою мірою залежить саме від потужності ВВЗП та від його коефіцієнта корисної дії. Підійти до межі мінімуму втрат потужності в гарматі та ВВЗП можна шляхом належного професіонального їх конструювання та виготовлення. Мінімум втрат в накопичувачі можна забезпечити шляхом вибору конденсаторів накопичувача з високоякісним діелектриком. За такої умови, виконати яку принципово не важко, найбільшу частину із загальних втрат можуть становити втрати на аноді лампи, зумовлені режимом роботи.

Останнє може бути також актуальним на стадії інтегрування окремих складових частин прискорювача в якісно єдине ціле.

## 6. ТИПОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ

Критеріями оптимуму режиму роботи можна прийняти: 1) мінімум миттєвої потужності, що розсіюється під час інжекції на аноді регулюючої лампи при нормальних умовах роботи, а також 2) мінімум миттєвої потужності, що розсіюється на аноді лампи при газовому розряді чи короткому замиканні в проміжку «анод — катод» електронної гармати. Останнє також означає і мінімальний розряд накопичувача при пробоях в гарматі та накладає вимоги на величину максимальної миттєвої потужності, яку лампа здатна розсіювати на своєму аноді.

Розглянемо графіки на рис. 3, на яких зображені три основні випадки миттєвого положення робочої точки А системи живлення електронної гармати, тобто положення точки перетину вольт-амперних характеристик лампи  $I_{ал} = I_{ал}(U_{ал}, U_{екр})$  та гармати

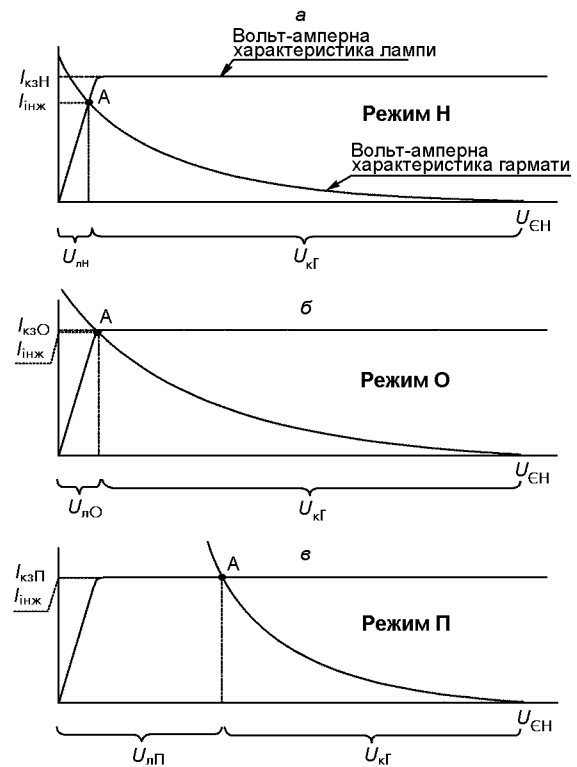


Рис. 3. Характерні режими роботи прискорювача на ємнісних накопичувачах

$I_{кГ} = pU_{кГ}^{3/2}$  в якусь фіксовану мить інжекції пучка.

Нехай потужність інжектваного пучка буде  $P_{інж} = I_{кГ}U_{кГ}$ , де  $I_{кГ}$ ,  $U_{кГ}$  — струм та напруга катоду гармати. Припустимо, що у всіх цих трьох випадках прискорювач інжектуює тільки прямокутний однаковий імпульс із тривалістю  $\tau_{інж}$ . Розглянемо якісно в кожному з показаних випадків величину втрат потужності на лампі як під час інжекції так і під час короткого замикання в гарматі.

При газовому розряді чи короткому замиканні в гарматі маємо  $U_{кГ} \approx 0$ . Тобто, висока напруга ємнісного накопичувача  $U_{єн}$  практично повністю падає на лампу, оскільки анодна напруга лампи

$$U_{ал} = U_{єн} - U_{кГ}.$$

Але обмежувальний струм короткого замикання  $I_{кз}$ , що протікає при цьому через лампу, взагалі можна встановити різним, оскільки це може бути продиктовано різними потребами (наприклад, формування особливого імпульсу інжекції).

Зрозуміло також, що якраз коротке замикання в гарматі накладає вимогу до максимально допустимих миттєвої та середньої потужностей, які повинна розсіювати лампа на своєму аноді. Глибина

розряду накопичувача внаслідок інжекції однакового прямокутного імпульсу буде у всіх цих типових випадках однакова й приблизно рівна

$$\Delta U_{\text{сн}} = \frac{I_{\text{кГ}} \tau_{\text{інж}}}{C_{\text{сн}}}$$

для достатньо великої ємності  $C_{\text{сн}}$  і для відносно короткого імпульсу  $\tau_{\text{інж}}$ . Але максимальна глибина розряду при можливих пробоях і короткому замиканні в гарматі буде різною, оскільки вона буде залежати від струму стабілізації короткого замикання  $I_{\text{кз}}$ , величина якого визначається встановленою керуючою напругою на екранній сітці лампи.

Легко бачити, що за всіх інших однакових умов глибина розряду ємнісного накопичувача та потужність, що розсіюється на аноді лампи, у всіх трьох режимах буде різною.

**Режим типу Н (Недогрів).** Цей випадок характерний або для недостатньо нагрітого катода гармати, або для невиправдано великої встановленої межі струму короткого замикання (рис. 3, а). Робоча точка А знаходиться в області відносно малих напруг на початковій похилій ділянці вольт-амперної характеристики лампи до точки її перегину. Глибина розряду  $\Delta U_{\text{кзН}}$  накопичувача при короткому замиканні більша, ніж при інжекції, оскільки струм короткого замикання  $I_{\text{кзН}}$  може бути більшим, ніж струм інжекції  $I_{\text{інж}} \approx I_{\text{кГ}}$ . Тому втрати на лампі при нормальних умовах інжекції мінімальні і складають  $P_{\text{лН}} = I_{\text{кГ}} U_{\text{лН}}$ .

Але під час короткого замикання чи газового розряду в гарматі лампа перебуває в найважчих умовах. До неї прикладається майже вся висока напруга  $U_{\text{сн}}$  ємнісного накопичувача, і через неї проходить найбільший струм  $I_{\text{кзН}}$ , тому на аноді лампи розсіюється максимальна потужність  $I_{\text{кз}} U_{\text{сн}}$ .

**Режим типу О (Оптимальний).** Робоча точка А знаходиться в області перегину вольт-амперної характеристики лампи (рис. 3, б). Втрати на лампі при нормальній інжекції майже мінімальні і складають  $P_{\text{лО}} = I_{\text{кГ}} U_{\text{лО}}$ . При короткому замиканні в гарматі лампа перебуває в менш важких умовах, порівняно з режимом типу Н, оскільки через неї проходить менший струм  $I_{\text{кзО}}$ .

Глибина розряду  $\Delta U_{\text{кзО}}$  накопичувача при короткому замиканні майже така, як при інжекції. Але оскільки  $I_{\text{кзО}} < I_{\text{кзН}}$ , то глибина розряду менша, ніж при режимі типу Н, тобто  $\Delta U_{\text{кзО}} < \Delta U_{\text{кзН}}$ .

**Режим типу П (Перегрів).** Цей випадок може бути характерним для занадто перегрітого катода гармати або для невиправдано малої встановленої межі струму короткого замикання (рис. 3, в). Робоча точка А знаходиться за точкою перегину

вольт-амперної характеристики лампи в області її струмостабілізуючих властивостей.

Під час інжекції втрати на лампі в порівнянні з іншими режимами найбільші (оскільки напруга на лампі під час інжекції найбільша) і складають  $P_{\text{лП}} = I_{\text{кГ}} U_{\text{лП}}$ . При короткому замиканні в гарматі лампа перебуває приблизно в таких же умовах, як і при режимі типу О, тобто в менш важких умовах, порівняно з режимом типу Н, оскільки через неї проходить менший струм  $I_{\text{кзП}} \approx I_{\text{кзО}} < I_{\text{кзН}}$ .

Глибина розряду  $\Delta U_{\text{кзП}}$  накопичувача при короткому замиканні приблизно така, як і при інжекції.

Але саме таке положення робочої точки, тобто режим типу П, приходиться використовувати, наприклад, при інжекції імпульсів відносно великої тривалості трикутної форми, або прямокутної з плоскою вершиною.

Тобто, під час нормальної інжекції прямокутного імпульсу максимальні втрати на лампі характерні для режиму типу П. Мінімальні втрати має режим типу Н. Але, якщо повністю відкрита лампа може мати низьку анодну напругу, тобто напруга точки перегину вольт-амперної характеристики лампи невелика, то втрати на аноді лампі в цьому режимі можуть бути не набагато більшими, ніж в режимі типу О.

З іншого боку, при виникненні короткого замикання в гарматі, за всіх інших однакових умов, але при різних режимах роботи, напруга на накопичувачі зменшиться по-різному:

$$\Delta U_{\text{кзП}} \leq \Delta U_{\text{кзО}} < \Delta U_{\text{кзН}}$$

оскільки струми обмеження короткого замикання відносяться як

$$I_{\text{кзП}} \leq I_{\text{кзО}} < I_{\text{кзН}}$$

Максимальна глибина розряду накопичувача та більший час відновлення нормальної робочої напруги на накопичувачі (і значить, максимальні витрати енергоресурсів джерел бортового живлення) у випадку пробоев у гарматі будуть при режимі типу Н. Але вони різко зменшуються по мірі наближення режиму роботи до режиму типу О й далі слабо зменшуються по мірі прояву режиму типу П.

Отже, для умов інжекції з великою імовірністю виникнення пробоев або газового розряду в проміжку «анод — катод» гармати оптимальним з точки зору як витрат енергоресурсів, так і навантаження на лампу буде режим типу О. Тому у випадку інжекції імпульсів, різноманітних за формою та амплітудою, прискорювач повинен працювати в режимі, близькому до режиму типу О, якомога більшу частину часу.

Одним із способів забезпечення оптимального режиму може бути підбір порядку розташування імпульсів з різними параметрами у циклограмі інжекції та підбір тривалості пауз між ними. Якщо якоюсь мірою це дозволяють задачі експерименту, імпульс з малою енергією інжекції можливо розташувати за імпульсом з великою енергією інжекції (коли глибина розряду накопичувача велика) на такій відстані по часу, коли і енергія імпульсу може бути забезпечена, і амплітуда напруги на лампі не більше необхідної. Крім того, в деяких межах шляхом зміни нагріву катода гармати можна змінювати характер залежності вольт-амперної характеристики гармати  $I_{\text{кр}} = pU_{\text{кр}}^{3/2}$  таким чином, щоб положення робочої точки відповідало оптимальному режиму. Це нескладно, наприклад, у випадку застосування в діодній гарматі катода прямого розжарення.

## 7. ОСОБЛИВІ МОЖЛИВОСТІ

1) Завдяки емнісному накопичувачу потужність енергоспоживання від бортмережі набагато менша в порівнянні з потужністю інжектваного імпульсу. Наслідком цього є можливість застосовувати джерело живлення та високовольтний перетворювач напруги менших потужностей, мас, об'ємів та собівартостей.

2) Застосування регулюючої лампи дає принципову можливість не просто вмикати або вимикати струм інжекції, але й одержувати різноманітні форми імпульсів струму електронної гармати — чи модульовані за будь-яким законом, чи з абсолютно гладкою вершиною.

Слід підкреслити, що в гладких імпульсах при цьому відсутня небажана паразитна модуляція інжектваного пучка, зумовлена недостатньою фільтрацією випрямленої високої напруги живлення гармати. В традиційних системах прямого живлення електронної гармати з прямим безпосереднім перетворенням низької напруги у високу, таких як в експериментах «Зірниця», «Аракс» (Paton, 1978), такі пульсації можуть досягати великих значень амплітуди (наприклад, 25 % високої напруги). Усунути їх зовсім — принципово важко. В прискорювачі на емнісних накопичувачах таких пульсацій в гладких імпульсах можна уникнути зовсім, якщо подавати на лампу керуючий сигнал відповідно гладкої форми. У всякому разі згладити пульсації в колі екранної сітки лампи значно легше схематичними засобами, ніж зробити це саме в потужному високовольтному колі гармати традиційної системи прямого живлення.

При жорстких вимогах до модуляції струму інжектваного пучка — відсутності або наявності її — неважко застосувати спеціальні схеми живлення сіток лампи.

3) При виникненні високовольтних пробоїв чи короткого замикання в гарматі лампа автоматично може служити обмежувачем струму короткого замикання високовольтного кола. Це захищає гармату і високовольтне коло її живлення від руйнування, а високовольтний накопичувач — від глибокого розряду.

4) ВВЗП не генерує таких потужних електромагнітних шумів, як високовольтний перетворювач напруги в традиційному прискорювачі прямого живлення (Paton, 1978). Це не тільки працює на користь чистоти експерименту (оскільки активним впливом на середовище, яке вивчається, буде саме інжекція електронів, а не електромагнітних шумів), але й спрощує вирішення проблем електромагнітної сумісності з чутливою бортовою апаратурою.

5) Пентодні характеристики лампи корисні також і тим, що легко дають можливість інжектувати імпульси з великим струмом, — більшим допустимого анодного струму однієї лампи. Для цього в прискорювачі можна застосовувати паралельне з'єднання потрібної кількості однотипних ламп.

6) Принципово можливо й нескладно у випадку, коли вимагається одночасне та незалежне керування формами імпульсів як струму, так і енергії в прискорювачі цього типу, застосовувати багатоелектродну гармату — тріодну, тетродну та інші. В цьому разі, використовуючи додаткові електроди гармати, можна отримати різноманітні комбінації форм імпульсів струму та енергії інжекції, наприклад трикутну форму імпульсів струму при прямокутній формі імпульсів енергії або навпаки.

## 8. ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Прискорювачі як традиційної схеми прямого живлення (Paton, 1978), так і схеми з емнісним накопичувачем мають свої окремі області застосування. Межа розділу областей застосування цих двох типів прискорювачів значною мірою визначається циклограмою інжекції, тобто тривалістю імпульсів інжекції та пауз між ними, а також енергією та силою струму інжектваного електронного пучка. Апитання оптимального циклограми інжекції в кожному експерименті, взагалі кажучи, існує завжди.

Прискорювач прямого живлення здатний інжектувати електронні пучки навіть неперервно без пауз, хоча в цьому і не завжди є потреба. А

прискорювач на ємнісних накопичувачах націлений саме на імпульсну інжекцію, коли за зондуючим імпульсом інжекції електронів слідує пауза для реєстрації відгуку навколишнього середовища на зондування. Тому переваги цього прискорювача перед прискорювачем з прямим перетворенням енергії зростають при збільшенні відношення

$$\frac{T_{\text{п}} + \tau_{\text{інж}}}{\tau_{\text{інж}}},$$

де  $\tau_{\text{інж}}$  — тривалість імпульсу інжекції, а  $T_{\text{п}}$  — тривалість пауз між інжекціями.

З точки зору економного використання бортових ресурсів енергії, маси та об'єму ефект від застосування цього прискорювача, як це може бути зрозумілим із принципової схеми та опису роботи Леонова (1996), можна очікувати у випадках, коли максимальна тривалість пауз між інжекціями хоча б у декілька разів перевищувала тривалість імпульсу інжекції, або у випадках, коли дуже імовірні високовольтні пробої в гарматі. Останнє, наприклад, може мати місце на відносно малих висотах 80—120 км, на початку ракетного експерименту, чи на такому його етапі, коли відбувається інтенсивне штучне або природне виділення газу поблизу апарата.

Очевидно, що доцільно застосовувати прискорювач саме цього типу, коли необхідно інжектувати електронні пучки з абсолютно гладкими вершинами чи формами імпульсів (наприклад, при тривалостях інжекції порядку 10—1000 мс) або при особливих формах імпульсів струму чи енергії пучка. Здатність цього прискорювача інжектувати або модульовані, або абсолютно гладкі імпульси на відміну від прискорювача традиційного типу дозволяє диференційовано, а значить і більш цілеспрямовано та свідомо використовувати фактори активного впливу при інжекції на середовище, яке вивчається.

*Балебанов В. М., Гагуа Т. И., Клос З. и др.* Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инъекции пучка электронов с высотного зонда. Исследование пучково-плазменного разряда. — М., 1983.—38 с.—(Препринт / АН СССР, ИКИ; № 781).

*Куклинский Б. Д., Леонов Н. А., Манагадзе Г. Г. и др.*

Ускоритель электронов на емкостных накопителях для активных экспериментов в космосе. — М., 1983.—18 с.—(Препринт / АН СССР, ИКИ; № 860).

*Леонов М. А.* Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-ємностях: основні співвідношення та оцінки // Космічна наука та технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 46—52.

*Манагадзе Г. Г., Мартинсон А. А., Леонов Н. А., Седов Н. А.* Бортовая малогабаритная система инъекции электронов на накопителях для активных ракетно-космических экспериментов // Активные эксперименты в космосе: Тр. ИПГ. — 1983.—Вып. 5.

*Managadze G. G., Balebanov V. M., Burchuladze A. A. et al.* Potential observations of an electron-emitting rocket payload and other relayed plasma measurements // Planet. Space Sci.—1988.—36, N 4.—P. 399—410.

*Paton B. E., Dudko D. A., Bernadsky V. N. et al.* A powerful electron accelerator for active space experiments // Space Science Instrumentation.—1978.—4, N 2—3.—P. 131—138.

*Sagdeev R. Z., Managadze G. G., Maiorov A. D., et al.* Peculiarity of the environment disturbance during the electron beam injection from the rocket. COSPAR // Adv. Space Res.—1981.—1, N 2.—P. 77—87.

#### ONBOARD ELECTRON ACCELERATOR WITH THE CAPACITANCE STORAGE: PECULIARITIES

M. A. Leonov

The onboard accelerator with the capacitance storage is flexible in the adjustment of main accelerator performances to the scientific tasks of an experiment. Such an accelerator is able to conform to the principles of the resource and energy saving technology. It has also many unique features which are very important just for a physicist-investigator. In order to reach higher performances of this accelerator, it is necessary not only to take into account special requirements, but also to set the optimal operating condition. Some most general peculiarities of several units of the onboard electron beam accelerator with the capacitance storage are briefly described from the point of view of physicist-investigator. Two versions of the accelerator scheme and the differences between them are considered. Special capabilities and the most appropriate application field of the accelerator are pointed out. The problem of operating conditions can also arise when several accelerator units are integrated into a single device. For this reason three main characteristic operating conditions of the electron beam accelerator with the capacitance storage are considered. There are two main criteria in the estimation of operating conditions: 1) the least power loss on the regulating lamp anode during electron injections and 2) the minimal discharge of the capacitance storage during a short-circuit or a high voltage avalanche breakdown between the anode and the cathode of the electron gun. The optimal operating mode in any general case can be chosen taking into account this qualitative consideration.