

УДК 537.8 : 537-7

**Ю. В. КОВТУН, Є. В. СЮСЬКО****ВИСОКОВОЛЬТНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ ГАЗОМЕТАЛЕВОЇ ПЛАЗМИ**

В роботі розглянута високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Описані конструкційні особливості імпульсної високовольтної системи живлення магнітної системи електрофізичної установки. Отримані розрахункові і експериментальні залежності розрядного струму через магнітну систему від часу. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближенні її до прямокутної.

**Ключові слова:** магнітна система, струм, напруга, розряд, електрична схема, індуктивність, опір, ємність.

**Вступ.** Експериментальне дослідження плазми в схрещених  $E \times B$  полях представляє інтерес для широкого кола фізичних і прикладних завдань фізики плазми при дослідженні лабораторної, термоядерної і космічної плазми [1]. Одним з цих завдань є дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми [2], яка утворюється в пристроях з схрещеними  $E \times B$  полями, які розглядаються як один із можливих варіантів створення пристроїв для розділення речовини на масові групи і елементи [3]. Тому постає нагальною постановка та проведення експериментальних досліджень властивостей багатокомпонентної газометалевої плазми, створеної контрольованим способом.

Важливою частиною електрофізичних пристроїв з схрещеними  $E \times B$  полями є системи живлення магнітної та електродно-розрядної систем. Основні параметри систем живлення формують можливі експериментальні умови при дослідженні плазми. При лабораторних дослідженнях також є вагомою можливість зміни у широкому діапазоні параметрів систем живлення. Створення густої плазми у сильних магнітних полях потребує достатньо потужних систем живлення, що вирішується у лабораторних умовах шляхом переходу від стаціонарних джерел до імпульсних.

Значна роль при створенні імпульсних магнітних систем відводиться системам їх живлення. Вибір оптимальних електрофізичних параметрів системи живлення та її конструкції дає змогу створювати достатньо сильні магнітні поля при прийнятних габаритних розмірах системи живлення магнітної системи. У лабораторних умовах вагомою є можливість зміни у широкому діапазоні значень розрядного струму через магнітну систему, відповідно величини магнітного поля. Не менш важливим є виконання умови зміни тривалості та форми імпульсу струму через магнітну систему.

В даній роботі розглядається високовольтна система живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближенні її до прямокутної.

**Опис магнітної системи.** Магнітне поле пробкової конфігурації, з пробковим відношенням 1,25, формується при розряді високовольтної системи живлення на шість соленоїдів два з яких торцеві і чотири центральні. Соленоїди виготовлені по типу соленоїдів

Біттера [4]. Матеріал дисків – алюміній. Два торцевих соленоїда мають внутрішній діаметр 23 см, зовнішній 44 см, кількість дисків 30. Чотири центральних соленоїда мають внутрішній діаметр 23 см, зовнішній 44 см, кількість дисків 40. Соленоїди мають повітряне охолодження. Більш детальна інформація магнітної системи наведена у роботі [5].

**Високовольтна система живлення магнітної системи.** Високовольтну систему живлення магнітної системи можна розділити на три основні блока: 1 – блок живлення нагромаджувача, 2 – блок ємнісного нагромаджувача, 3 – блок комутації.

Блок живлення нагромаджувача складається з автотрансформатора, високовольтного трансформатора і блоку випрямляча на діодах типу Д 1006. Блок ємнісного нагромаджувача системи живлення магнітної системи установки складається з 120 шт. конденсаторів типу ИМ-3-100 (100 мкФ, 3 кВ) з загальною ємністю 12 мФ та максимальним енерговмістом 54 кДж. Для зменшення габаритів ємнісного накопичувача конденсатори були зібрані в батарею, яку розмістили на чотирьох поверхах спеціальної конструкції по 30 конденсаторів на кожному поверху. Конденсатори з'єднані паралельно мідною шиною перерізом  $2 \times 0,3$  см і загальною довжиною 41,76 м. Батарея з'єднана з соленоїдами магнітної системи високовольтним кабелем загальною довжиною 20 м. До блока комутації входять комутатори на основі тиристорів ТЗ-320 та Т9-250, та їхня система запуску.

На рис. 1 зображена електрична схема системи живлення магнітної системи. Схема працює наступним чином. Схема живиться від електричної мережі 50 Гц, 220 В. Після вмикання перемикача SB 1 спрацьовує електромагнітний пускач К 1 і розмикаються контакти К 1.1 і К 1.2, які, при вимиканні живлення, замикають та зашунтовують контур ємнісного нагромаджувача через резистор R 13. Напруга подається на автотрансформатор TV 2, який регулює напругу, що подається на первинну обмотку високовольтного трансформатора TV 1. В подальшому з вторинної (високовольтної) обмотки трансформатора TV 1 напруга випрямляється системою діодів VD 1 – VD 7 і подається на батарею конденсаторів С 1 – С 120. На кожні 12 конденсаторів ставиться по 1 сигнальній лампі HL 1 – HL 12, по одному захисному резистору R 1 – R 12 та запобіжнику FU 1 – FU 12. Зарядна напруга

контролюється за допомогою кіловольметра kV, який вимірює напругу в двох діапазонах: 1,5 кВ та 3 кВ.

Пристрій формування керуючого імпульсу виконаний на основі тиратронів VL 1, VL 2, які живляться за допомогою трансформаторів TV 5, TV 6 і TV 7. Імпульс від блока запуску подається на імпульсні трансформатори TV 5, TV 6, після чого відбувається відкриття сітки тиратрона та формування керуючого

імпульсу, що подається через роздільні імпульсні трансформатори TV 8 і TV 9, діоди VD 10 – VD 13, на тиристри VS 1 – VS 4. Після чого відбувається розряд блока ємнісного накопичувача на магнітну систему установки. Запуск тиристора VS 4 відбувається з запізненням на 18 мс після відкриття VL 2. Це запобігає виникненню негативного півперіоду розряду на магнітну систему.

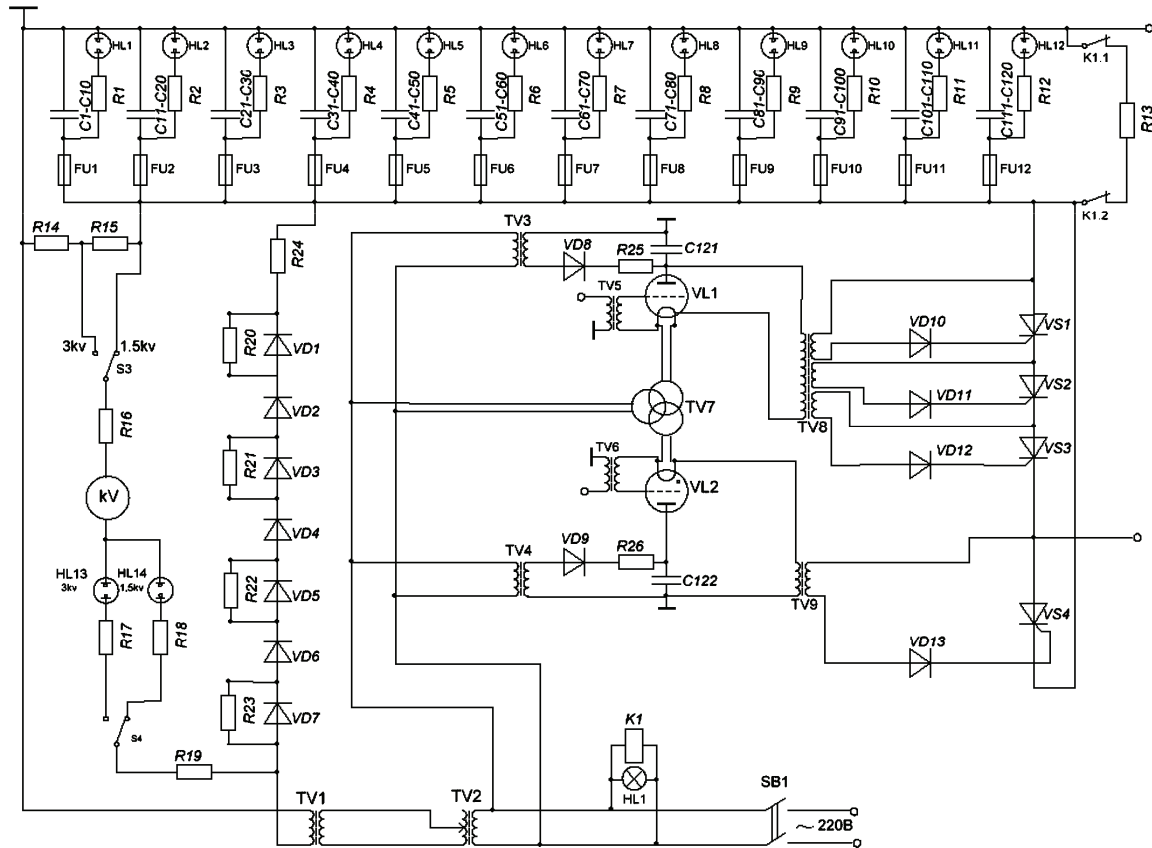


Рисунок 1 – Схема живлення магнітної системи

**Розрахунок розрядного струму магнітної системи.** В першому наближенні систему живлення магнітної системи можливо розглядати у вигляді схеми послідовного кола з зосередженими та постійними ємністю  $C$ , індуктивністю  $L$  та опором  $R$ , яка зображена на рис. 2. У цьому випадку, як видно з рис. 2, розряд ємнісного накопичувача на магнітну систему можна наближено розглядати, як розряд ємності в  $RLC$  колі [5]. Сумарний опір  $R$  та індуктивність  $L$  кола складаються з суми опорів та індуктивностей соленоїдів, кабелю, що з'єднує блок конденсаторів з соленоїдами, шин, що з'єднують між собою конденсатори, і шин, що з'єднують соленоїди. Спільна ємність  $C$  складається з суми ємностей 120 конденсаторів підключених паралельно.

Згасаючі електромагнітні коливання в  $RLC$  описуються однорідним диференціальним рівнянням другого порядку:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C \cdot L} = 0, \quad (1)$$

де  $q$  – заряд;  $q = \int Idt$ ;  $I$  – струм;  $I(t) = -\frac{dq}{dt}$ . Можливі три рішення рівняння 1 при наступних умовах:

$R < 2\sqrt{L/C}$ ,  $R = 2\sqrt{L/C}$ ,  $R > 2\sqrt{L/C}$ . У даному випадку при параметрах кола ємності  $C = 12$  мФ, індуктивності  $L = 2,66$  мГн та опору  $R = 0,107$  Ом виконується умова  $R < 2\sqrt{L/C}$ . У цьому випадку загальне рішення рівняння 1 має вигляд:

$$q(t) = e^{-\beta t} \left( c_1 \cdot \cos\left(\frac{\omega}{2} \cdot t\right) + c_2 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2} \cdot t\right) \right), \quad (2)$$

де  $\beta$  – ступінь згасання в колі;  $\beta = \frac{R}{2L}$ ;  $\omega$  – кутова

частота,  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ;  $\omega_0$  – власна частота коливань,

$\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ ;  $c_1$  та  $c_2$  – константи. При початкових умовах ( $t = 0$ ;  $I(0) = 0$ ;  $q(0) = q_0 = CU_0$ ,  $U_0$  – початкова напруга на ємнісному накопичувачі) константи  $c_1$  та  $c_2$  мають значення:

$$c_1 = q_0; \quad c_2 = \frac{2q_0\beta}{\omega}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлено результати розрахунку напруги, струму, заряду при наступних початкових умовах:  $C = 12$  мФ,  $L = 2,66$  мГн,  $R = 0,107$  Ом,

$U_0 = 1500$  В.

У другому наближенні систему живлення можна розглядати у вигляді довгої лінії, схема якої зображена на рис. 4, де  $C1 - C4$  – ємність 30 конденсаторів розташованих на кожному з чотирьох поверхів відповідно,  $R1 - R4$  та  $L1 - L4$  – опір та індуктивність шин, що з'єднують конденсатори,  $R5$  та  $L5$  – опір та індуктивність соленоїдів, шин, що з'єднують соленоїди, та кабелю, що з'єднує батареєю конденсаторів і соленоїди. Моделювання довгої лінії проводилось в програмі Micro-cap 11 for students. Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу при  $U_0 = 1500$  В для довгої лінії наведена на рис. 5, крива 3.

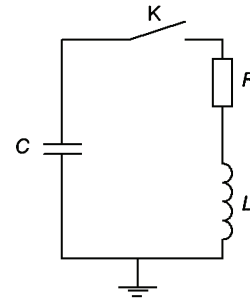


Рисунок 2 – Схема замінювання системи живлення для магнітної системи

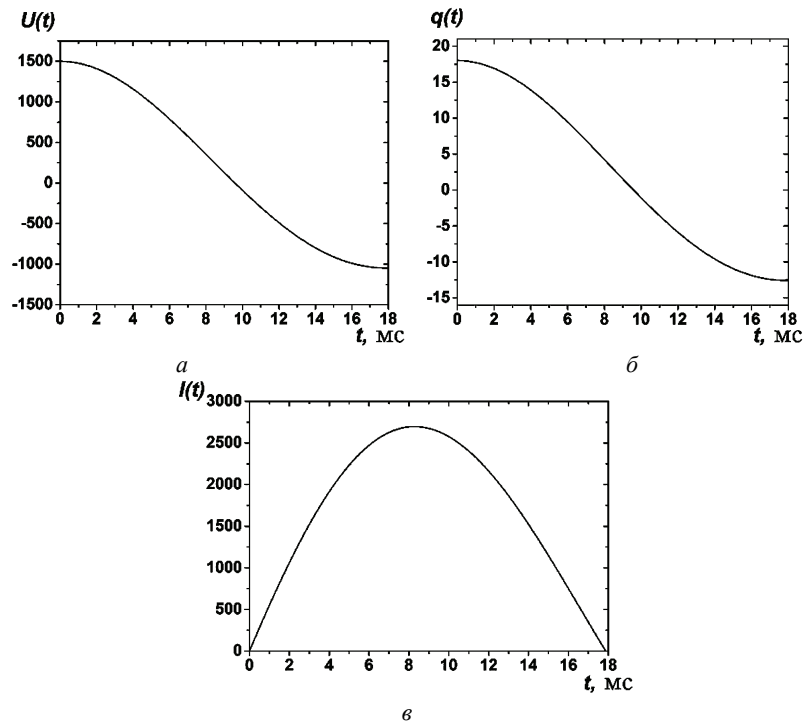


Рисунок 3 – Розрахункові залежності напруги (а), заряду (б) та струму (в) у RLC колі

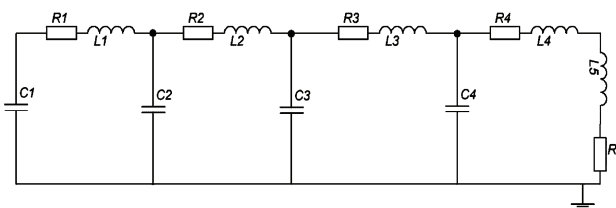


Рисунок 4 – Схема замінювання системи живлення магнітної системи електрофізичної установки у вигляді довгої лінії

**Вимірювання розрядного струму через магнітну систему.** Важливим при формуванні імпульсного магнітного поля є знання параметрів розрядного струму через магнітну систему. Тому було проведено експериментальне вимірювання струму. Розрядний струм через магнітну систему вимірювався за допомогою шунта, який був підключений послідовно з соленоїдами магнітної системи. Сигнал з шунта реєструвався електронним осцилографом «Velleman PCS 500».

Виміряна залежність розрядного струму через магнітну систему від часу при напрузі  $U_0 = 1500$  В наведена на рис. 5, крива 1. Порівняння експеримен-

тальної залежності з розрахунковими (див. рис. 5, крива 2,3) показує, що розбіжність тривалості імпульсу струму та його амплітуди (див. рис. 5) не перевищує  $\pm 2\%$ . Це говорить про те, що розрахунок сумарної ємності, індуктивності і опору магнітної системи виконано вірно. Але в експерименті (див. рис. 5, крива 1) фронт наростає швидше, а спад стрімкіший на відміну з розрахунком для послідовного кола з зосередженими параметрами (див. рис. 5, крива 2). Розрахунок розрядного струму при розгляді схеми живлення у вигляді довгої лінії (див. рис. 5, крива 3) показав, що фронт і спад у цьому випадку став більш наближений до експерименту. З останньої залежності можна зробити висновок, що спрощене представлення реальної схеми у вигляді довгої лінії не достатньо для збігу форми імпульсу, а потрібно знати точний розподіл опору, індуктивності, ємності елементів по довжині лінії.

На рис. 6 зображена залежність максимального значення розрядного струму через магнітну систему від прикладеної напруги  $U_0$  на ємнісному накопичувачі. Порівняння експериментально виміряної залежності максимального значення розрядного струму від по-

чаткової напруги (див. рис. 6) з розрахунковою залежністю (формули 2, 3) показує, що розбіжність між ними не перевищує  $\pm 2\%$ .

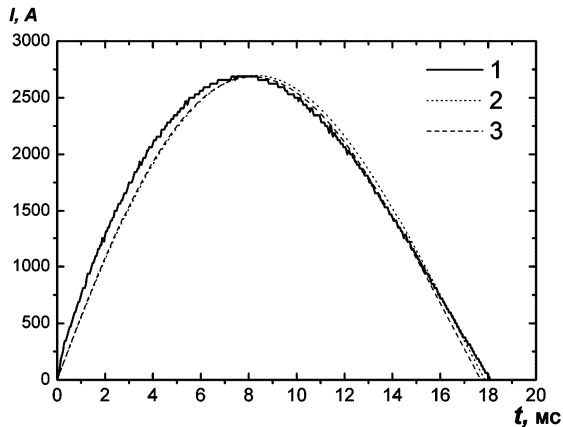


Рисунок 5 – Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу.  $U_0 = 1500$  В. Експериментально виміряна (1), розрахункові для послідовного кола з зосередженими параметрами (2) та довгої лінії (3)

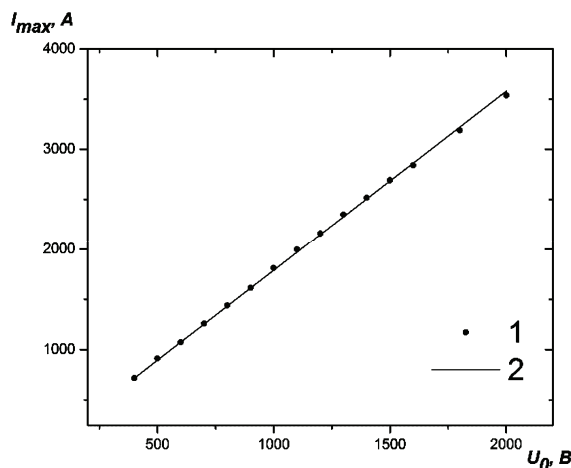


Рисунок 6 – Залежність максимального значення розрядного струму через магнітну систему від прикладеної напруги  $U_0$  на ємнісному накопичувачі. 1 – експеримент, 2 – розрахунок

**Формування квазістаціонарного імпульсу магнітного поля.** У даному випадку імпульс розрядного струму через магнітну систему має форму першого позитивного пів періоду затухаючої синусоїди (див. рис. 5, рис. 7, крива 1), відповідно цього змінюється і величина магнітного поля. При проведенні експериментальних досліджень плазми в схрещених  $E \times B$  полях є потреба досліджень параметрів плазми у квазістаціонарному магнітному полі. У даному випадку це потребує зміни форми імпульсу розрядного струму та наближенні її до прямокутної. Зважаючи на те, що штучна формуюча схема складається з кінцевого числа елементів  $L$  та  $C$ , сформуванню за допомогою такої схеми імпульсу точно прямокутної форми неможливо. Але при вірному виборі величини елементів  $L$  та  $C$  вдається отримати на нарузці імпульс з крутим фронтом з чітко вираженим плато, форма якого близька до прямокутної [8].

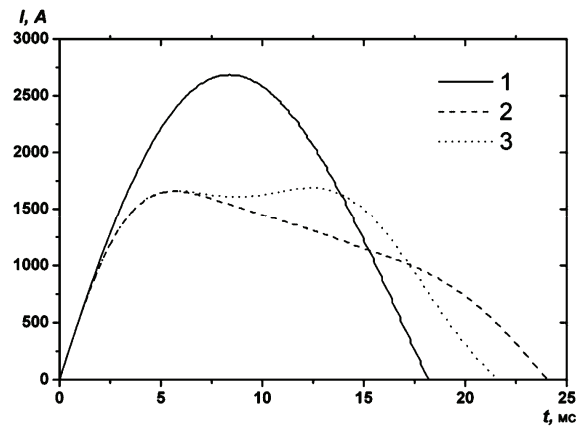


Рисунок 7 – Залежність розрядного струму через магнітну систему від часу.  $U_0 = 1500$  В: 1 – без додаткових котушок індуктивності у схемі; 2 – додано в схему три котушки з індуктивністю кожної 1730 мкГн; 3 – додано в схему три котушки з індуктивністю 250, 600 та 1730 мкГн

Для зміни форми розрядного струму і наближенню її до прямокутної було вирішено додати до електричної схеми додаткові котушки індуктивності, що дає змогу внести мінімальну кількість змін у схему живлення магнітної системи. Передбачається встановити три додаткові котушки індуктивності між поверхами ємнісного накопичувача, тобто в електричну схему (див. рис. 1) через 30 конденсаторів включається додаткова індуктивності. Конструктивно котушки індуктивності виконані у вигляді діелектричних циліндрів діаметром 10 см на яких в один шар, стик у стик, намотано мідний дріт  $\varnothing$  2,2 мм. Було розглянуто два варіанти, які відрізнялися параметрами додаткових індуктивностей. В першому варіанті передбачалося встановити три однакові додаткові котушки з індуктивністю кожної 1730 мкГн (кількість витків 136). Результати розрахунку для даного варіанту представлені на рис. 7, крива 2. Як видно з рис. рис. 7, крива 2 включення в схему трьох однакових котушок індуктивності призводить до зміни амплітуди і тривалості розрядного струму, а також змінюється форма імпульсу. Але форма імпульсу розрядного струму не відповідає поставленій задачі. В другому варіанті було підібрано та додано в схему три котушки з індуктивністю 250, 600, 1730 мкГн та відповідно кількістю витків 50, 80, 136. Результати моделювання наведені на рис. 7, крива 3. При цьому формується імпульс розрядного струму (див. рис. 7, крива 3) тривалістю 21,6 мс, форма якого має плато тривалістю 9,6 мс. Зміна розрядного струму на плато не перевищує 5%. Тобто, в даному варіанті є можливість сформувати квазістаціонарне магнітне поле тривалістю 9,6 мс. Недоліком у даному випадку являється суттєве зменшення максимальної амплітуди розрядного струму до 1690 А ( $\sim 1,6$  разів) в порівнянні з випадком без додаткових котушок індуктивності у схемі (див. рис. 7, крива 1). Це призведе до того, що зменшиться максимальне значення величини магнітного поля. Але при деяких дослідженнях плазми в схрещених  $E \times B$  полях така форма імпульсу може бути цілком задовільною.

**Висновки.** Розглянуті і описані конструкційні особливості імпульсної високовольтної системи живлення магнітної системи електрофізичної установки для отримання та дослідження багатокомпонентної газометалевої плазми. Проведено порівняння експериментально вимірених значень амплітуди і тривалості імпульсу розрядного струму через магнітну систему з розрахунковими, яке показало, що розбіжність тривалості імпульсу струму та його амплітуди не перевищує  $\pm 2\%$ . Розглянута можливість зміни форми імпульсу струму через магнітну систему та наближення її до прямокутної у випадку додання до електричної схеми додаткових котушок індуктивності. Розрахунки показали, що при доданні в схему трьох котушок з індуктивністю 250, 600, 1730 мкГн існує можливість сформувати імпульс розрядного струму тривалістю 21,6 мс, форма якого має плато з тривалістю 9,6 мс. Відповідно можливо сформувати квазістаціонарне магнітне поле з тривалістю 9,6 мс.

**Список літератури:** 1. *Lehnert B.* Rotating plasmas / *B. Lehnert* // Nuclear Fusion. – 1971. – Vol. 11, № 5. – P. 485–533. 2. Rotation of Plasma Layers with Various Densities in Crossed E×B / *Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, A.I. Skibenko, V.B. Yufarov* // Ukr. J. Phys. – 2013. – Vol. 58, № 5. – P. 450–457. 3. *Fetterman A. J.* Metrics for comparing plasma mass filters / *A. J. Fetterman, N. J. Fisch* // Physics of Plasmas. – 2011. – Vol. 18, № 10. – P. 103503 (8pp). 4. *Bitter F.* The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil / *F. Bitter* // Review of Scientific Instruments. – 1936. № 7. – P.482–488 5. Электрофизическая установка для исследования свойств многокомпонентной плазмы отражательного разря-

да в среде тяжелых газов и паров металлов / *А. И. Скибенко, Е. И. Скибенко, Ю. В. Ковтун, Ю. В. Ларин* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С.147–157. 6. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные поля / *Г. Кнопфель*; пер. с англ. под ред. *Ф. А. Николаева, Е. П. Свириденко*. – М.: Мир, 1972 – 382 с. 7. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / *Д.Монтгомери*; пер. с англ. под ред. *Н. Е. Алексеевского*. – М.: Мир, 1971 – 360 с. 8. *Литвиненко О.Н.* Расчет формирующих линий / *О.Н. Литвиненко, В.И. Сошников*. – К.: ГИТТЛ, 1962 – 116 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Lehnert B.* Rotating plasmas. *B. Lehnert.* Nuclear Fusion. 1971. Vol. 11. № 5. pp. 485–533. 2. Rotation of Plasma Layers with Various Densities in Crossed E×B. *Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, A.I. Skibenko, V.B. Yufarov.* Ukr. J. Phys. 2013. Vol. 58. № 5. pp. 450–457. 3. *Fetterman A. J.* Metrics for comparing plasma mass filters. *A. J. Fetterman, N. J. Fisch.* Physics of Plasmas. 2011. Vol. 18. № 10. pp. 103503 (8pp). 4. *Bitter F.* The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil. Review of Scientific Instruments. 1936. № 7. pp. 482–488 5. *Elektrofizicheskaya ustanovka dlya issledovaniya svoystv mnogokomponentnoy plazmy otrazhatelnogo razryada v srede tyazhelykh gazov i parov metallov.* *A. I.Skibenko, E. I. Skibenko, Yu. V. Kovtun, Yu. V. Larin.* Vesnik NTU "KhPI". 2008. № 44. pp. 147–157. 6. *Knopfel G.* Sverkhstilnyye impulsnyye polya. *G.Knopfel.* per. s angl. pod red. *F. A. Nikolayeva, E. P. Sviridenko.* Moscow: Mir. 1972. 382 p. 7. *Montgomeri D.* Poluchenije silnykh magnitnykh poley s pomoshchyu solenoidov. *D. Montgomeri.* per. s angl. pod red. *N. E. Alekseyevskogo.* Moscow: Mir. 1971 360 p. 8. *O.N. Litvinenko Raschet formiruyushchikh liniy.* *O.N.Litvinenko, V.I.Soshnikov.* Kyyiv: GITTL. 1962. 116 p.

*Надійшла (received) 05.04.2016*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ковтун Юрій Вікторович**, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник; ННЦ ХФТІ НАНУ, тел.: +38(057) 335-63-13; email: ykovtun@kipt.kharkov.ua.

**Ковтун Юрій Вікторович**, mat. Ph.D.; senior researcher, NSC KIPT, tel.: +38(057) 335-63-13; email: ykovtun@kipt.kharkov.ua.

**Сюсько Євген Васильович**, молодший науковий співробітник; ННЦ ХФТІ НАНУ, email: zhenya-syusko@kipt.kharkov.ua.

**Сіуско Євген Васильович**, junior researcher; NSC KIPT, email: zhenya-syusko@kipt.kharkov.ua.