

24. Пат. 28489 Україна, МПК В60/К17/06. Планетарна коробка передач / Стрілець О.Р. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и № 2007 09132 ; заявл. 09.08.07 ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20, 2007 р.

25. Пат. 108239 Україна, МПК F 16 H 1/28. Пристрій для керування змінами швидкості / Стрілець О.Р., Малащенко В.О., Стрілець В.М. ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – и №2016 00131 ; заявл. 04.01.16 ; опубл. 11.07.16, Бюл. № 13, 2016 р.

26. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин : підруч. / Я.Т. Кіницький ; НАН України. – К. : «Наук. Думка», 2002. – 660 с.

Отримана/Received : 22.2.2017 р. Надрукована/Printed : 8.6.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Малащенко В.О.

УДК 669.1:537.5

В.С. КУРСКОЙ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ, О.С. ЗДИБЕЛЬ  
Хмельницький національний університет

## АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЖИВЛЕННЯ ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОГО РОЗРЯДУ В УСТАНОВКАХ АЗОТУВАННЯ

*Розглянуто питання апаратного забезпечення процесу азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням. Проведено аналіз існуючих методів реалізації електронного ключа та режимів їх роботи. В ході аналізу встановлено, що основним недоліком існуючих рішень є те, що при їх практичній реалізації не були враховані значні сплески напруги на комутуючому елементі, які виникають внаслідок замикання або розмикання ланцюга. Для усунення даної проблеми авторами запропоноване нетривіальне рішення, яке полягає у послідовному з'єднанні ключових елементів та організації для них синхронного керування. Також було вирішене питання визначення параметрів керуючого сигналу по відношенню до властивостей робочої камери.*

*Ключові слова:* азотування, тліючий розряд, циклічно-комутоване живлення, електронний ключ.

V.S. KURSKOY, V.V. LIUKHOVETS, O.S. ZDYBEL  
Khmelnyskiy National University

## HARDWARE REALIZATION OF A POWER SUPPLY OF A CYCLIC SWITCHED DISCHARGE IN NITRIDING INSTALLATIONS

*The problems of hardware support of the nitriding process in a glow discharge with cyclic-switched power are considered. The analysis of existing methods of electronic key implementation and their operation modes is carried out. In the course of the analysis it was found that the main drawback of the existing solutions is that, in their practical implementation there are significant spikes in the voltage across the switching elements that resulted from the closure or opening of the circuit were not taken into account. To eliminate this problem, the authors proposed a non-trivial solution, which consists in the consecutive connection of key elements and the organization of synchronous control for them. The question of determining the parameters of the control signal with respect to the properties of the working chamber was also solved.*

*Keywords:* nitriding, glow discharge, cyclic-switched power, electronic key.

### Вступ

Серед значної кількості методів модифікації поверхонь тертя чільне місце посідає технологія азотування в тліючому розряді. Однією з основних переваг цієї технології є керованість процесом та його результатами. Серед сукупності методів керованого впливу на процеси при азотуванні в тліючому розряді особливо актуальними є методи пов'язані з живленням камери струмом з нестационарними параметрами, зокрема циклічно-комутованим струмом. Впровадження режиму циклічної комутації при азотуванні в тліючому розряді відкриває додаткові у порівнянні з традиційним азотуванням в тліючому розряді можливості підвищення ефективності та якості вказаної технології, насамперед:

- розширюється можливість азотування деталей складної форми (наявність глибоких та вузьких пазів, отворів малого діаметра та значної глибини тощо). Зокрема, для отворів менше 8 мм імпульсне живлення більш ефективно оскільки забезпечує азотування всередині отворів [1];

- значно спрощуються вимоги до формування садки, усувається проблема штучного створення щілин та пазів, що виникає при надмірному зближенні деталей одне до одного [2].

- знижується ризик локальних ушкоджень модифікованих поверхонь за рахунок зменшення ймовірності виникнення дугових розрядів;

- розширюється допустимий діапазон регулювання таких важливих з точки зору оптимізації технологічного процесу параметрів як тиск в розрядній камері та температура поверхні деталей;

- для варіанту автономної системи нагрівання деталей значно спрощується контроль недопущення перегрівання поверхні, спричиненої виділенням додаткової енергії розряду [3–5].

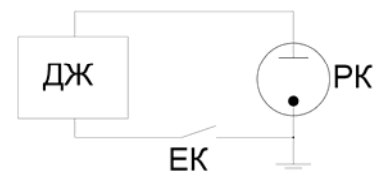


Рис. 1. Ідеалізована схема реалізації циклічно-комутованого живлення тліючого розряду

**Виклад основного матеріалу**

Основні положення розробки апаратури для циклічної комутації розряду викладені в роботі [6]. Схему установки для реалізації циклічно-комутованого живлення тліючого розряду в ідеалізованому вигляді можна представити наступним чином (рис. 1), де РК – розрядна камера, ДЖ – джерело живлення, ЕК – електронний ключ.

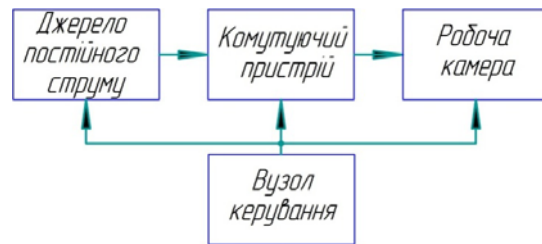


Рис. 2. Структурна схема комплексу для реалізації режимів азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням

Структурна схема апаратури реалізації циклічно-комутованого живлення тліючого розряду наведена на рис. 2.

Використання електронного ключа в ланцюгу живлення камери дозволяє не змінюючи потужності, що виділяється на катоді збільшити напругу катодного падіння, а отже збільшити кінетичну енергію іонів.

Основною проблемою при організації циклічно-комутованого живлення є вибір елементної бази. До недавнього основним елементом електронного ключа були електронні лампи. Відомі варіанти реалізації такого живлення з використанням водневого тиратрона ТГІІ-500/16 [7]. Експериментальний стенд, описаний в роботі, являє собою дещо удосконалену схему, зазначену на рис. 2.

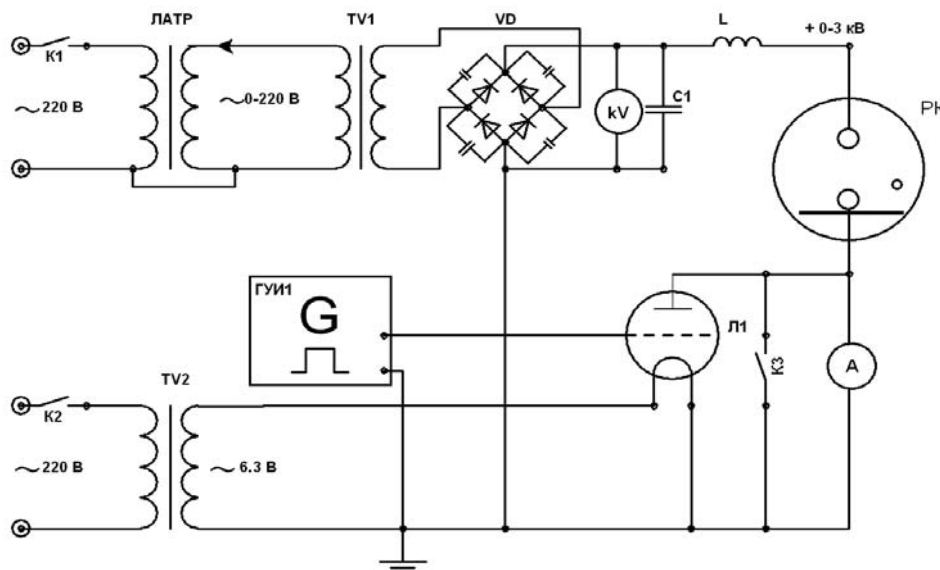


Рис. 3. Реалізація азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням з тиратроном в якості ключового елемента

В даному устаткуванні напруга на катод робочої камери подається з лабораторного автотрансформатора ЛАТР та розв'язуючого трансформатора TV1 через діодний міст VD і може бути змінена в межах від 0 до 3000В. І, оскільки в схемі відсутній активний захист від переходу тліючого розряду в дуговий, його функції частково виконує дросель L. Для періодичного переривання струму в тліючому розряді застосовано водневий тиратрон (ЛІ) ТГІІ-16/500. Частота переривання струму задається генератором керуючих імпульсів (ГУІІ). анод тиратрона з'єднується з катодом розрядного вузла, а катод заземлюється. При подачі на сітку тиратрона позитивних імпульсів з амплітудою близько 420 В він періодично відкривається і в розрядному вузлі загоряється розряд. До недоліків використання газорозрядних ламп в якості електронного ключа в циклічно-комутованому тліючому розряді слід віднести складність тепловідведення, значні габарити та складність монтажу лампи, наявність накалу, складність організації керування роботою ключа через необхідність забезпечення високої напруги на сітку, низька довговічність [8]. На сьогоднішній день на зміну електронним лампам в якості ключових елементів імпульсних схем прийшли напівпровідникові прилади – транзистори та тиристри. Вдалий приклад реалізації циклічно-комутованого живлення з транзистором в якості ключового елемента наведено в [6]. Функціональну схему контролера переривчастого режиму наведено на рис. 4.

Особливістю даної реалізації є акцент на захисті від переходу тліючого розряду в дуговий та захисті від перевантажень електронного ключа. Практичний досвід використання такої схеми підтвердив її працездатність в широкому діапазоні напруги та струму. Проте виявився недолік, який проявлявся в виході силового ключа через пробій високою напругою при тому, що значення діючої напруги контролювалися та знаходилися в допустимих межах. Така поведінка транзисторів електронного ключа пов'язана з тим, що характерною особливістю, притаманною для циклічно-комутованого живлення, є наявність сплесків напруги на електродах розрядної камери, які можуть стимулювати відповідні субпроцеси, наприклад – розпорощення поверхні, дифузію в глибину поверхневого шару тощо. І, оскільки, робоча камера, з певними

припущеннями може бути представлена у вигляді індуктивного навантаження [9], характерні сплески напруги виникають як при замиканні ланцюга «джерело живлення – робоча камера» так і при його розмиканні (рис. 5).

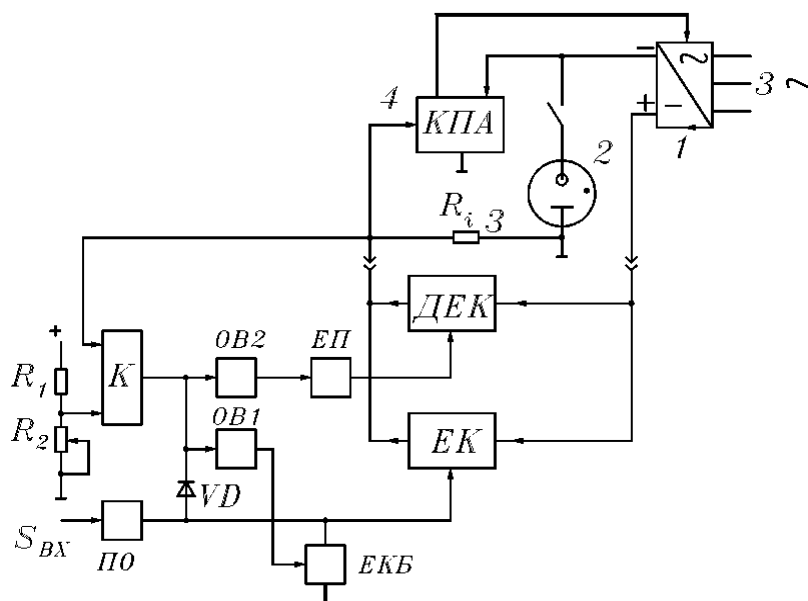


Рис. 4. Функціональна схема контролера переривчастого режиму:

1 – трифазний випрямляч; 2 – розрядна камера; 3 – датчик струму; 4 – контролер процесу азотування;  
 $R_i$  – датчик струму;  $R_1$ ,  $R_2$  – задатчики порогу; К – компаратор;  $S_{BX}$  – вхідний керуючий сигнал;  
 ПО – підсилювач-обмежувач; ОВ1, ОВ2 – одновібратори; ЕК – електронний ключ; ДЕК – допоміжний електронний ключ; ЕП – емітерний повторювач; ЕКБ – електронний ключ блокування; VD – діод блокування

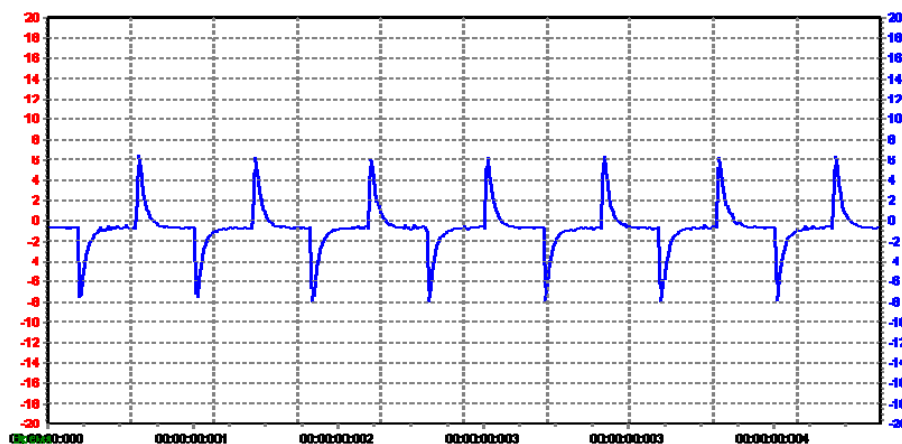


Рис. 5. Характерний вигляд осцилограми падіння напруги на робочій камері при азотуванні в циклічно-комутованому тліючому розряді

Характерний для всіх кривих сплеск струму та напруги може складати понад 80% по відношенню до стаціонарного значення [10]. В ході дослідження режимів роботи електронного ключа було виявлено режими, при яких амплітуда напруги комутованого струму досягає значень понад 3000 В при величині пікового струму понад 20 А. Забезпечення комутації струму в таких умовах, виходячи з існуючої елементної бази є досить складною. Зокрема, переважна більшість напівпровідникових елементів мають пікове значення робочої напруги, яке не перевищує 1200 В. Виходячи з вищесказаного логічно було б реалізувати схему ключа з послідовним включенням транзисторів. Традиційна схема послідовного включення транзисторів наведена на рис. 6 [11].

Проте така схема ефективно працює при відносно невисокій частоті комутації (близько 1 кГц), при цьому зі збільшенням кількості транзисторів частотні характеристики погіршуються, що обмежує робочий діапазон частот комутації. Для побудови електронного ключа, який би працював на більш високих частотах необхідно організувати одночасне керування всіма транзисторами ланцюга (рис. 7). Реалізація такого керування можлива лише при наявності гальванічно ізолюваного драйвера.

Для досягнення цієї мети може бути використаний оптрон або трансформатор. Кожен з варіантів має свої переваги та недоліки. Було обрано керування затворами ключових транзисторів за допомогою інтегрального оптронного драйвера HCNW-3120. Мікросхема забезпечує піковий струм управління затворами транзисторів 2 А (в режимі установки високого і низького рівня сигналів), що дозволяє використовувати її без додаткових каскадів. Напруга живлення драйвера знаходиться в діапазоні від 15 до

30 В. Важливим параметром також є напруга гальванічної розв'язки оптопар. В даному випадку воно становить не менше 5000 В, що дозволяє використовувати мікросхему в усьому діапазоні напруги катодного падіння робочої камери. Схема драйвера одного силового транзистора наведено на рис. 8.

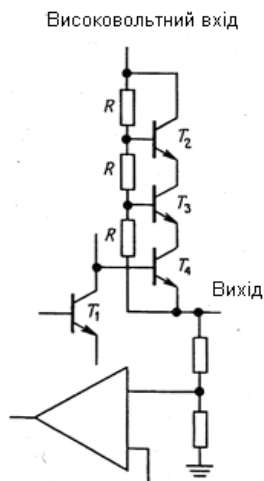


Рис. 6. Послідовне включення транзисторів для підвищення напруги пробою

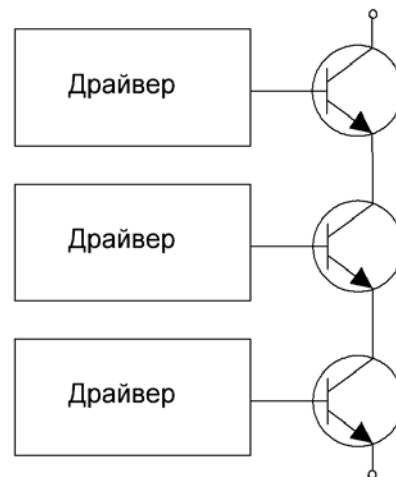


Рис. 7. Структурна схема послідовного з'єднання транзисторів з синхронним керуванням

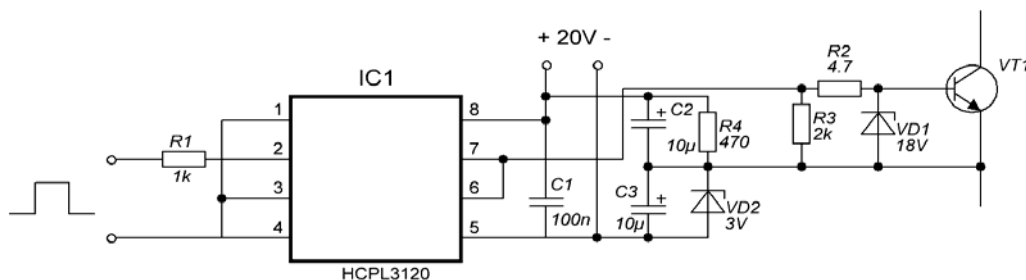


Рис. 8. Схема драйвера силового транзистора

Для забезпечення оптимальної роботи такої схеми було вирішено два ключових питання: коригування напруги на кожному з елементів та розробка схеми керування. Основною проблемою при організації послідовного включення є симетрування роботи кожного з елементів, оскільки при наявності несиметричності в роботі елементів один з них відкривається та закривається раніше за інші, що в свою чергу призводить до підвищених втрат тепла на даному елементі, а отже зниженню надійності системи в цілому. Для статичного симетрування було використано резистори R1-R3, включені паралельно кожному з транзисторів T1-T3. Умовою динамічної симетрії є забезпечення малих відхилень часу проходження сигналу в драйвері. Для цього можуть бути використані RC або RCD ланцюги, які можуть дуже ефективно підтримувати динамічну симетрію. Ці ланцюги зменшують, а потім балансують швидкість  $dv/dt$  при комутації. Однак, вимогою для більшості пасивних силових компонентів є висока надійність елементів RC або RCD ланцюгів, які повинні витримувати високі напруги. Перевагою пасивного динамічного симетрування є відсутність додаткової схеми керування транзистором, достатньо використовувати стандартний драйвер [12]. З урахуванням вищезазначеного схема з'єднання силових ключів наведена на рис. 9.

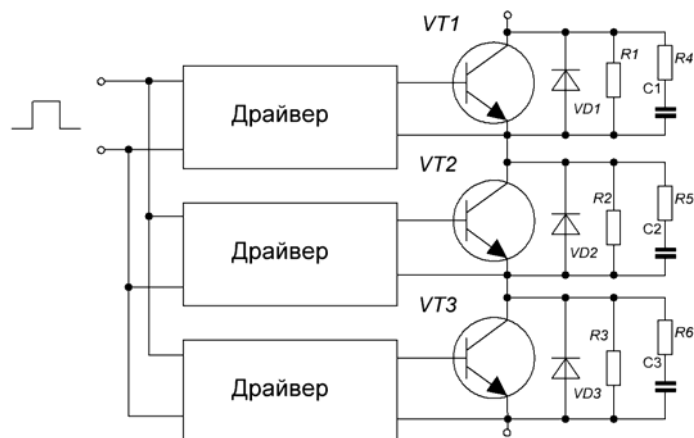


Рис. 9. Схема послідовного з'єднання ключових елементів

Таким чином, проблему перевищення допустимого значення напруги на елементах електронного ключа було вирішено. Проте залишається актуальним питання параметрів керуючого сигналу. Зокрема частоти та коефіцієнта заповнення імпульсу. На рис. 10 наведено осцилограму напруги на електродах робочої камери. Як видно з рисунку мікрофазы наявності живлення на електродах розрядної камери чергуються з мікрофазы його відсутності. Таким чином змінюючи параметри роботи електронного ключа

можна регулювати часові характеристики «народження» та «загибелі» розрядних процесів. Виходячи з того, що форма керуючої напруги є прямокутною, до таких параметрів слід віднести частоту та шпаруватість сигналу. В розрізі того, що при запалюванні та згасанні розряду має місце коливальний процес (робоча камера являє собою LC-контур), а також з огляду на особливості роботи електронного ключа актуальною є питання вибору граничних значень частоти та шпаруватості керуючого сигналу.



Рис. 10. Осцилограми напруги катодного падіння при азотуванні зразків з титану ВТ-3 з циклічно-комутованим живленням частотою 1кГц, 50 В/под

Експериментально було встановлено, що мінімальною актуальною межею частоти керуючих імпульсів є частота порядку 500 Гц, в той час як верхня межа, зважаючи на наявність коливального процесу зі сталими для даних умов роботи камери параметрами була обмежена частотою в 10кГц. Такі параметри керуючого сигналу актуальні для сигналу у формі меандру, тобто коли коефіцієнт заповнення сигналу становить 50%. В якості критерію, обмежуючого частоту і коефіцієнт заповнення сигналу є стала часу перехідних процесів в камері та на електронному ключі. Коефіцієнт заповнення зв'язаний з частотою імпульсів наступною залежністю

$$D = \tau \cdot \nu, \quad (1)$$

де  $\tau$  – тривалість імпульсу, с;  $\nu$  – частота імпульсів, Гц.

Тривалість імпульсу не повинна бути меншою за тривалість перехідних процесів, оскільки при цьому електронний ключ працює нестабільно і може бути виведений з ладу високою напругою викиду. Таким чином умова працездатності ключа запишеться наступним чином:

$$\tau \gg \tau_{\text{мін}}, \quad (2)$$

де  $\tau_{\text{мін}}$  – мінімально допустимий час імпульсу, який чисельно дорівнює тривалості перехідних процесів.

Звідки визначасмо граничне значення коефіцієнта заповнення:

$$D = \tau_{\text{мін}} \cdot \nu.$$

Зважаючи на те, що визначена в ході досліджень стала часу перехідних процесів камери не перевищувала значення в 30 мкс, то для діапазону частот від 500 Гц до 10 кГц робоча зона може бути представлена наступним чином (рис. 11):

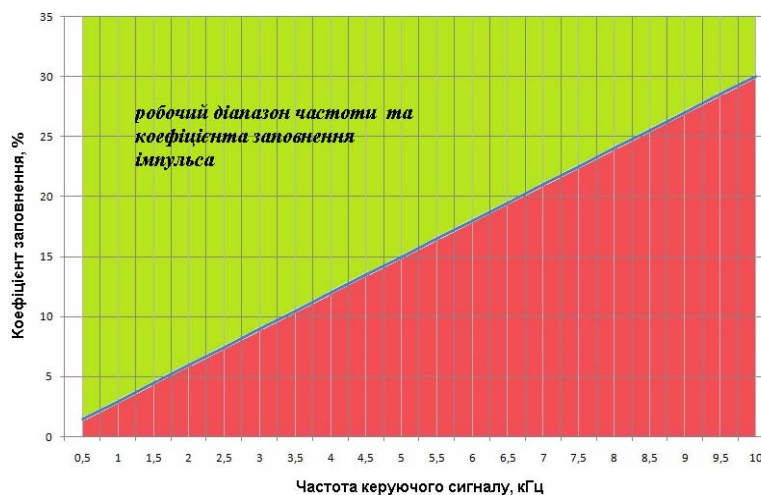


Рис. 11. Робочий діапазон коефіцієнта заповнення імпульсу керуючого сигналу

### Висновки

Таким чином, застосування запропонованого комплексу в якості ключа при реалізації циклічно-комутованого живлення при азотуванні в тліючому розряді дозволило реалізувати весь спектр робочих напруг та струмів, оскільки значення цих величин обмежуються лише кількістю застосованих елементів, що відкриває шлях до експериментального використання циклічно-комутованого розряду для модифікації поверхні металевих сплавів на принципово новій основі.

## Література

1. Kwon S. C. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes / S. C. Kwon, G. H. Lee, M. C. Yoo // 1st International conference of ion nitriding. – Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77-81.
2. Remges W. Plasma (Ion) nitriding and plasma (Ion) nitrocarburizing units, application and experiences / W. Remges, J. Luhr // Proceedings of a International Conference of Ion Nitriding & Carburizing. – Cincinnati, Ohio. – 1989.
3. Grun R. Pulse plasma treatment the innovation for ion nitriding / R. Grun // 1st International conference of ion nitriding. – Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 143-168.
4. Grun R. Industrial advances for plasma nitriding / R. Grun // Ion nitriding and ion carburizing: 2nd International conference of ion nitriding/carburizing. – Cleveland, Ohio. – 1989. – P. 157-163.
5. Dressler S. Plasma parameter control for industrial situations: The role of hot wall plasma nitriding furnaces / S. Dressler // Ion nitriding and ion carburizing: 2nd International conference of ion nitriding/carburizing. – Cleveland, Ohio. – 1989. – P. 183-195.
6. Давидов А. М. Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно комутованому тліючому розряді / А. М. Давидов, М. В. Лук'янюк, І. М. Пастух // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 1. – С. 50-53.
7. Токарев А.В. Ионное азотирование стали в импульсном тлеющем разряде / А. В. Токарев // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2009. – Т. 9. – № 11. – С. 51-57.
8. Батушев В. А. Электронные приборы : учебник для вузов / В. А. Батушев. – 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1980. – С. 302-303.
9. Пастух І.М. Вихідні положення визначення електричних характеристик при азотуванні в тліючому розряді з нестаціонарним живленням / І. М. Пастух, М. В. Лук'янюк, В. О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 1. – С. 7-10.
10. Пастух І. М. Перехідні процеси вмикання струму в установці для азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням / І. М. Пастух, М. В. Лук'янюк, В. О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 3. – С. 11-15.
11. Хоровиц П. Искусство схемотехники. В 3 т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1993.
12. Nicolai, U. u.a. Application Manual Power Modules; 2000 ISBN 3-932633-46-6.

Отримана/Received : 3.5.2017 р. Надрукована/Printed : 8.6.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Стечишин М.С.

УДК 539.3

А.О. РАМСЬКИЙ

Хмельницький національний університет

### **ЗМЕНШЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ПЛИТИ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОКРИТТЯ ЇЇ ШАРОМ ІЗ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ**

*В роботі розглянуто спосіб впливу на розподіл напружень навантаженої плити, що лежить на жорсткій основі, за допомогою зовнішнього попередньо напруженого шару. Проведено аналіз отриманих результатів. Визначено доцільність покриття матеріалів зовнішнім шаром із початковими напруженнями для зменшення у них напружень.*

*Ключові слова: двошарова плита, початкові напруження.*

A.O. RAMSKY

Khmelnytskyi National University

### **STRESS REDUCTION OF PLATE UNDER EXTERNAL LOAD BY ITS COVER LAYER WITH INITIAL STRESSES**

*We consider a way of influence on the distribution of loaded plate stress lying on a rigid base, with external prestressed layer. Axisymmetric task was posed. We examined conditions under which it is correct to use correlation of linearized elasticity theory for bodies with initial stresses. By Hankel's integral transformation it was received solution obtained through functional equations system. The functional systems Numerical solution was implemented by Gauss method. We received the conclusion about plate stress decrease if initial layer stresses are compressible. The analysis of the results was carrying out. Feasibility of materials coating by external layer with initial stresses for reducing their stress was determined.*

*Keywords: double layer plate, initial stresses.*

**Вступ.** У багатьох практичних задачах часто постає питання зменшення напружень у конструкціях при дії на них різними силовими навантаженнями. Дана проблема виникає при розрахунку основ конструкцій, несучих поверхонь і т.п. Нерідко основа таких конструкцій представляє собою плиту.