

2. Successive approximation ADC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://en.wikipedia.org/wiki/Successive_Approximation_ADC
3. Измерения и контроль в микроэлектронике: учебное пособие по специальностям электронной техники / [Н. Д. Дубовой, В. И. Осокин, А. С. Очков и др.]. – М. : Высш. шк., 1984. – 367 с.
4. Глинкин Е. И. Технология аналого-цифровых преобразователей : [монография] / Е. И. Глинкин, М. Е. Глинкин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 140 с.
5. Троцишин І. В. Напрямки квантової теорії вимірювального перетворення фізичних величин на основі єдиної дробово-раціональної шкали вимірювань / І. В. Троцишин // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 196 – 201.
6. Гуляс О. Й. Вимірювання постійної напруги методом коінциденції / О. Й. Гуляс, О. П. Войтюк, І. В. Троцишин // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 89 – 93.
7. Троцишин І. В. Шляхи підвищення роздільної здатності шкали вимірювального перетворення ЦАП і АЦП / І. В. Троцишин, О. П. Войтюк, Н. І. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 236 – 242.
8. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1019 с.

Надійшла 22.9.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.

УДК 621.78/ (66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНЮК, В.О. КУРСКАЯ, В.І. КУХАР
Хмельницький національний університет

ПРОЦЕС РОЗМИКАННЯ СТРУМУ В УСТАНОВЦІ ДЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Виконано аналіз зміни електричних параметрів в установці для азотування в тліючому розряді зі змінним живленням при вимкненні напруги.

The analysis of change of electric parameters is executed in a nitridings plant in a gas discharge with a variable feed in case of setting off tension.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, розмикання, електричні параметри.

В попередніх роботах, присвячених перехідним процесам в установці для азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням, розглянуті ввідні положення стосовно цих процесів, а також питання зміни в часі напруги та струму в момент замикання силового ключа [1– 4]. Таким чином, досліджені перехідні явища, які мають місце в установках в той момент, коли напруга стрибкоподібно збільшується від нульового значення до певного номінального, характерного у відповідності до технологічних параметрів модифікаційного процесу. Встановлено, що деякі з електричних характеристик в цей момент у значній мірі відрізняються від номінального значення параметра, регламентованого режимом, що при незначній тривалості циклу наявності напруги на електродах камери, характерній, наприклад, для циклічно комотованого та йому подібних процесів, може відігравати суттєву роль у формуванні поверхневого модифікованого шару, його фазової структури та, відповідно, властивостей. При цьому слід мати на увазі, що частота процесів зміни параметрів живлення порядку десятка кілогерц, тому доля впливу фаз їх стабілізації суттєва, що обов'язково потрібно враховувати в аналітичному апараті прогнозування наслідків модифікації [2]. В цій роботі передбачається розглянути перехідні процеси, які притаманні установкам азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням у фазі вимкнення напруги. При цьому передбачається, що нестационарні явища при замиканні та розмиканні електронного ключа (ЕК) не перекриваються, що дозволяє розглядати ці процеси незалежно.

Еквівалентна схема установки в режимі розмикання електронного ключа ЕК показана на рис. 1.

На рис. 1 використані умовні позначення: E – електрорушійна сила (ерс) джерела живлення, R_{ϕ} , C_{ϕ} – відповідно опір та ємність фільтра згладжування, R_{δ} – баластний опір, L – еквівалентна індуктивність камери, $C_{\text{ЭК}}$ – ємність електронного ключа в розімкнутому стані, R_K – резистивний опір камери змінному струмові. Позитивний напрямок напруги u та струму i камери відповідають

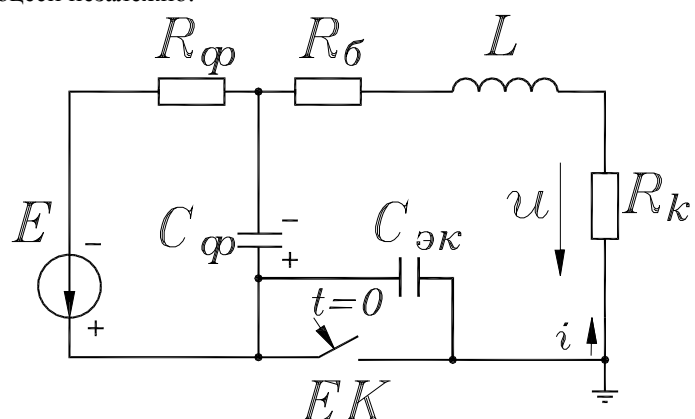


Рис. 1. Еквівалентна схема установки в режимі розімкнення ключа

загальноприйнятій в технологічній практиці.

Для аналізу схеми на рис. 1 представимо її у вигляді операторної схеми заміщення (рис. 2), в якій всі елементи початкової схеми замінено операторними відображеннями. При цьому позначення елементів зберігається аналогічно прийнятим в роботі [3], тобто

$$E(p) = E/p,$$

а для зручності подальших викладок перепозначено $R_\phi = R_1, R_\delta = R_2, C_\phi = C$.

Значення параметрів $U_c(0), i(0)$ знаходяться шляхом використання результатів, наведених в роботі [3] для стаціонарного режиму

$$U_c(0) = E - \frac{\Delta E R_1}{R_1 + R_2},$$

де $\Delta E = E - U_\Gamma$,

U_Γ – ерс фіктивного джерела, чисельно рівна напрузі горіння на електродах камери в усталеному режимі;

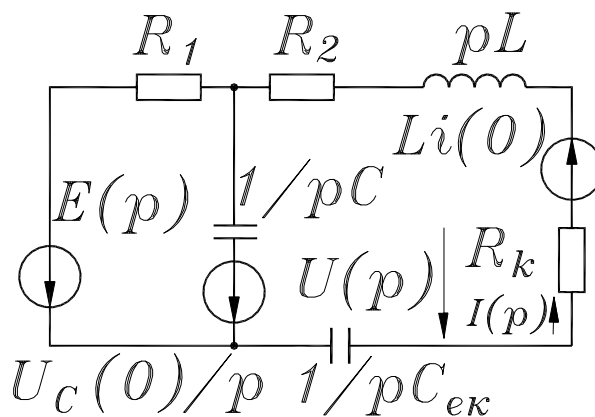


Рис. 2. Операторна схема заміщення

$$i(0) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2}.$$

З метою спрощення аналізу слід врахувати наступні обставини. По-перше, метою дослідження є короткочасні процеси, тривалість яких не перевищує час деіонізації розрядного проміжку після розімкнення ключа. Ємність C фільтра настільки велика, що протягом цього часу напруга на ємності практично не зміниться, а це дозволяє розглядати в ході аналізу тільки правий контур схеми на рис. 2. По-друге, оскільки ємність C практично послідовно включена стосовно значно меншої (більш, ніж в тисячу разів) ємності $C_{ек}$, то впливом ємності C на процес допустимо знехтувати. Спрощена операторна схема приведена на рис. 3.

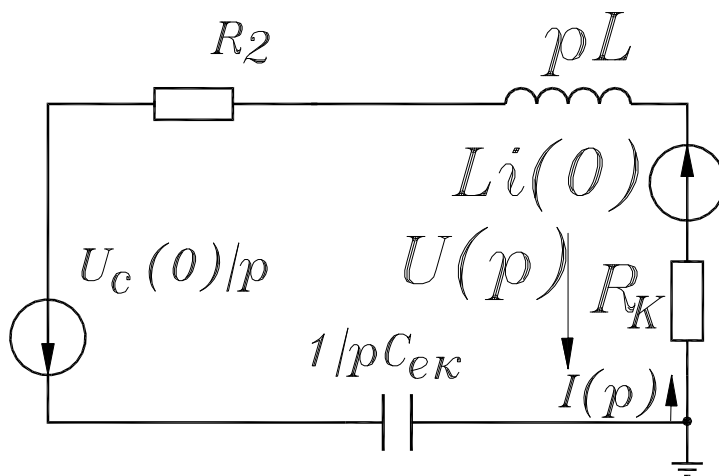


Рис. 3. Спрощена операторна схема

Операторний опір ланцюга

$$Z(p) = R_2 + R_k + pL + \frac{1}{pC_{ек}} = \frac{L}{p} (p^2 + 2\delta p + \omega_0^2),$$

де $\omega_0^2 = 1/\sqrt{LC_{ек}}$ – резонансна частота послідовного коливального контуру,

$2\delta = R_B/L$ (опори R_1 та R_2 об'єднані в один загальний опір втрат контуру $R_B = R_1 + R_2$).

Операторне відображення струму камери

$$I(p) = \left(\frac{U_c(0)}{p} + Li(0) \right) \frac{1}{Z(p)} = i(0) \frac{p + \frac{U_c(0)}{Li(0)}}{p^2 + 2\delta p + \omega^2} = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \frac{p + a}{p^2 + 2\delta p + \omega^2},$$

$$\text{де } a = \frac{U_c(0)}{Li(0)} = \frac{ER_2 + U_r R_1}{L\Delta E}.$$

Оригінал струму у відповідності до формули розкладу

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \left(\frac{p_1 + a}{2(p_1 + \delta)} e^{p_1 t} + \frac{p_2 + a}{2(p_2 + \delta)} e^{p_2 t} \right),$$

де p_1, p_2 – корені рівняння $p^2 + 2\delta p + \omega^2 = 0$.

Після підстановки значень коренів

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega^2}$$

та після певних перетворень отримаємо вираз для зміни струму в часі

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\delta t} \left[\text{ch}\alpha\delta t + \frac{\frac{a}{\delta} - 1}{\alpha} \text{sh}\alpha\delta t \right],$$

$$\text{де } \alpha = \sqrt{1 - \omega^2/\delta^2}.$$

Найбільш ймовірним в цьому випадку буде коливальний режим, при якому $\omega^2 > \delta^2$,

$$\alpha = j\beta,$$

$$\text{де } \beta = \sqrt{\omega^2/\delta^2 - 1} > 0.$$

Тоді

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\delta t} \left[\cos \beta\delta t + \frac{\frac{a}{\delta} - 1}{\beta} \sin \beta\delta t \right].$$

При переході до безрозмірного часу $x = \delta t$

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot e^{-x} \left[\cos \beta x + \frac{\frac{a}{\delta} - 1}{\beta} \sin \beta x \right].$$

З отриманих рівностей з очевидністю слідує можливість негативних викидів струму як за рахунок складової з косинусом, так і за рахунок складової з синусом в дужках. Внесок складової з синусом визначається коефіцієнтом

$$A = \frac{\frac{a}{\delta} - 1}{\beta},$$

де $\frac{a}{\delta} = 2 \frac{ER_2 + U_r R_1}{\Delta E (R_k + R_2)} = 2 \frac{(1+x)R_2 + R_1}{x(R_k + R_2)}$, при цьому $x = \frac{\Delta E}{U_r}$, а величину β можна виразити

через добротність послідовного коливального контуру

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega_0^2}{\delta^2} - 1} = \sqrt{4 \frac{\rho^2}{R_{II}^2} - 1} = \sqrt{4Q^2 - 1}.$$

Через $\rho = \sqrt{\frac{L}{C_{ЕК}}}$ позначено характерний опір контуру.

Слід зазначити, що наявність синусної складової струму обумовлює наявність не тільки негативного, але і позитивного викиду безпосередньо вслід за моментом комутації. Величина позитивного викиду залежить від величини A .

Розглянемо для ілюстрації приклад. Нехай $R_1 = R_2 = R$, $R_k \ll R_2$, $x = \Delta E/U_r = 0,25$.

В цьому випадку

$$A \approx \frac{17}{\beta} = \frac{17}{\sqrt{4Q^2 - 1}}$$

$$\text{При } Q \gg 1 \quad A \approx \frac{8,5}{Q}$$

В цьому випадку при наведених умовах величина A залежно від Q може змінюватись в широких межах – від значень порядку одиниці до надзвичайно малих величин. В останньому варіанті відносним вкладом синусної складової можливо знехтувати.

Напруга на електродах камери знаходиться як сума

$$u = -L \frac{di}{dt} - R_K i,$$

звідки отримаємо

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= \frac{\Delta E L}{R_1 + R_2} \left[e^{-\delta t} (A\beta\delta \cos \beta\delta t - \beta\delta \sin \beta\delta t) - \delta e^{-\delta t} (\cos \beta\delta t - A \sin \beta\delta t) \right] = \\ &= \frac{\Delta E}{2} \frac{R_2 + R_K}{R_1 + R_2} \cdot e^{-\delta t} \left[(A\beta - 1) \cos \beta\delta t - (A + \beta) \sin \beta\delta t \right] \end{aligned}$$

$$iR_K = \frac{\Delta E R_K}{R_1 + R_2} e^{-\delta t} [\cos \beta\delta t + A \sin \beta\delta t].$$

Для подальшої ілюстрації використаємо дані з попереднього прикладу, при цьому

$$\begin{aligned} u &= -\frac{\Delta E}{4} e^{-\delta t} \left[16 \cos \beta\delta t + \left(\frac{17}{\beta} + \beta \right) \sin \beta\delta t \right] = \\ &= -\Delta E e^{-\delta t} \left[4 \cos \beta\delta t - 0,25 \left(\frac{17}{\beta} + \beta \right) \sin \beta\delta t \right] \end{aligned}$$

Для випадку високої добротності контуру $Q \gg 1$

$$\begin{aligned} u &= -\Delta E e^{-\delta t} \left[4 \cos \beta\delta t + \frac{1}{4} \left(\frac{8,5}{Q} + 2Q \right) \sin \beta\delta t \right] \approx \\ &\approx \Delta E e^{-\delta t} \left[\left(\frac{Q}{2} + \frac{2,25}{Q} \right) \sin \beta\delta t - 4 \cos \beta\delta t \right] \end{aligned}$$

що демонструє можливість позитивного викиду напруги при високій добротності контуру.

Висновок. Проведений аналіз перехідних процесів зміни струму при розмиканні живлення свідчить про можливість при певних умовах різкого короткочасного підвищення напруги та струму.

Література

1. 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. – 2012. – № 1. – С. 7–10.
2. Пастух І. М. Аналітичні критерії утворення нітридів при азотуванні в тліючому розряді з нестаціонарним живленням / І. М. Пастух, М. В. Лук'янюк, В. О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 2. – С. 25–33.
3. 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.
4. Пастух І. М. Зміна напруги при вмиканні 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. – № 4. – С. 7–12.

Надійшла 13.9.2012 р.
Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.