

УДК 652.1:586.24

О.О. Азюковський, канд. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

## ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ СТІКАННЯ З ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ З ВРАХУВАННЯМ ОСНОВНИХ ДЖЕРЕЛ ЗБУРЕНЬ ДЛЯ ПІДЗЕМНИХ МЕТАЛЕВИХ КОМУНІКАЦІЙ

**Анотація.** В роботі розглянуті фактори, які впливають на струми стікання з підземного металевго газопроводу. Отримано вираз, який враховує складові, що зумовлюють величину струму стікання з трубопроводу. Отриманий результат дозволяє більш точно оцінювати корозійний стан і, як результат, формувати певні режими роботи елементів електрохімічного захисту.

**Ключові слова:** електрохімічна корозія, електрохімічний захист; підземний сталевий трубопровід; ток стікання з трубопроводу.

**Аннотация.** В работе рассмотрены факторы влияющие на токи стекания с подземного стального газопровода. Получено выражение, которое учитывает составляющие, которые формируют величину токов стекания с трубопровода. Полученный результат позволяет более точно оценивать коррозионную опасность и формировать параметры работы элементов электрохимической защиты.

**Ключевые слова:** электрохимическая коррозия, электрохимическая защита; подземный стальной трубопровод; ток стекания с трубопровода.

**Abstract.** The paper considers the factors influence the runoff currents from the underground steel pipeline. An expression is obtained that considers the components that form the magnitude of the currents flowing from the pipeline. The result obtained allows us to more accurately assess the dangerous of corrosion and to form the parameters of the electrochemical protection elements.

**Keywords:** electrochemical corrosion, electrochemical protection; underground steel pipeline; current flowing from the pipeline.

### Постановка проблеми та її зв'язок з прикладним задачами

Україна має розгалужену систему трубопровідного транспорту який є найбільш ефективним та раціональним для транспортування великих об'ємів рідинних та газоподібних речовин. Природний газ є однією із енергетичних складових, що користується великим попитом у всьому світі як для потреб промисловості так й для побутових цілей. Можливість використання природного газу задля забезпечення процесу його транспортування, готовність до кінцевого використання з мінімальною кількістю етапів перетворень, відносна простота процесу отримання з нього теплової енергії зумовлюють його привабливість та довготривалу перспективу використання. В Україні одночасно із магістральними системами газопроводів існують розгалужені мережі промислового та побутового споживання.

Переважну частину системи підземних газопроводів складають металеві трубопроводи. Термін експлуатації підземних металевих трубопроводів складає декілька десятків років. Водночас, слід зауважити, що відповідно до регламентних робіт здійснюється безперервний поточний ремонт, що зумовлює ситуацію, коли ланка газопроводу має ділянки із значними відмінами у часі експлуатації. Зручність експлуатації, здатність транспортувати великі об'єми газу, надійність, мінімальна залежність від природних умов зумовлюють актуальність завдання щодо збереження у робочому стані системи підземних газопроводів. Крім того, слід враховувати що навіть мінімальне порушення герметичності газопроводу призводить не тільки до втрат речовини, що транспортується, а й до значних екологічних ризиків. Тому забезпечення цілісності системи підземних металевих газопроводів зумовлює актуальність заходів та наукових завдань що спрямовані на підвищення ступеню надійності трубопровідного транспорту.

Однією із важливих ланок у експлуатації підземних металевих трубопроводів є система електрохімічного захисту. Електрохімічна корозія є одним із найбільш суттєвим фактором, що зумовлює надійність та, одночасно, є основним фактором ризику, що зумовлює цілісність газопровідної мережі.

**Результати досліджень.** Корозійна ситуація, що складається навколо підземного металевго об'єкту, визначається струмами стікання з нього. Струми стікання з трубопроводу визначають інтенсивність вимивання металу з стінок. Підземні трубопроводи часто знаходяться в межах активного впливу струмів, що блукають, які зумовлені залізничним електрифікованим транспортом. Водночас, підземні

комунікації знаходяться під впливом системи катодного захисту від електрохімічної корозії. Вони також формують електротехнічні кола струму, у тому числі й зменшуючи струми стікання. Отримання виразу, що забезпечує можливість розрахунку струмів стікання з трубопроводу, що знаходиться одночасно під впливом залізничного транспорту та сучасної системи катодного захисту є актуальною науковою задачею.

У випадку, коли залізнична електрифікована система транспорту є завантаженою, що відбувається у часи пікового навантаження, її можливо розглянути як систему з рівномірно розподіленим навантаженням [1]. Електричне поле, що створено контактною мережею залізничного транспорту визначається згідно до виразу [1-3]:

$$E_x^z = -\frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{\infty} j_r(\zeta) \frac{d\zeta}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y^2}} - \frac{i\omega\mu}{4\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} I_o(\zeta) \left( \frac{1}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-\zeta)^2 + y_1^2}} \right) d(\zeta), \quad (1)$$

де  $y_1^2 = y^2 - \frac{2i}{\gamma^2}$  - відстань від джерела електричного поля до точки, що розглядається;  $\zeta$  - лінійний розмір (прирошення) ділянки, що розглядається;  $\omega$  - частота поля;  $\mu$  - магнітна проникність;  $x$  - координата повздож трубопроводу;  $j_r$  - струм стікання з рейок;  $I_o$  - повний струм електротехнічної системи, що розглядається;  $\sigma$  - провідність ґрунту;  $i$  - струм рейок;  $\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$  - коефіцієнт згасання; .

Наявність електричного поля (1) зумовлює розподіл струму, яке на основі виразу (2) визначається, здійснивши заміну координат, його рішенням (3) [1-4]:

$$I''(z) - \alpha^2 I(z) = -\frac{E_z^{zv}(z)}{R_{per}^t} \quad (2)$$

$$I''_t(x) - \alpha_t^2 I_t(x) = -\frac{E_x^{zv}(x)}{R_{per}^t} \quad (3)$$

де  $\alpha_t = (1+i)\beta_t$  - стала розповсюдження,  $R_{per}^t$  перехідний опір трубопроводу.

Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_{per}^t = R_{t}^{iz} + R_t^1 \quad (4)$$

де  $R_{t}^{iz}$  - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Перетинний опір трубопроводу визначається як:

$$R_t^1 = \frac{1}{\pi\sigma} \ln \frac{1.12}{\gamma\sqrt{r_t H}} \quad (5)$$

де  $H$  - глибина залягання трубопроводу,  $\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$  - коефіцієнт згасання в ґрунті.

Рівняння (2) має рішення, що поєднує закон зміни зовнішнього поля (напруги)  $E_x^{zv}$  та залежність зміни струму трубопроводу  $I_t$  за його довжиною  $x$ . Вважаючи трубопровід нескінченним, запишемо:

$$I_t(x) = \frac{1}{2\alpha_t R_{per}'} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} E_x^{zv}(t) dt \quad (6)$$

Поєднуючи (1) та (6) отримаємо вираз для струму трубопроводу:

$$I_t(x) = -\frac{1}{4\pi\alpha_t\sigma R_{per}'} \left( \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} dt \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{\infty} j_r(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y^2}} + \right. \\ \left. + i\gamma^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha_t|x-t|} dt \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\xi) \left( \frac{1}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(t-\xi)^2 + y_1^2}} \right) d\xi \right) \quad (7)$$

де  $y_1, y_2$  відстані, що враховують товщину стінок трубопроводу.

Вираз для визначення струму трубопроводу  $I_t$  (7) вздовж його довжини, що зумовлений впливом електрифікованої залізничної колії містить значення струму стікання з рейок  $j_r$ . Проте, корозійний ефекти визначається струмом стікання з трубопроводу  $j_t$ . Для спрощення розрахунку запишемо вираз (7) враховуючи, що  $\xi = \tau + t$  [5,6]:

$$I_t = -\frac{1}{4\pi\sigma\alpha_t R_{per}'} \left( \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau) d\tau}{\sqrt{\tau^2 + y^2}} + i\gamma^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \left( \frac{1}{\sqrt{\tau^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{\tau^2 + y_1^2}} \right) d\tau \right); \quad (8)$$

$$f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial j_r(\tau+t)}{\partial t} e^{-\alpha_t|x-t|} dt; \quad (9)$$

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\tau+t) e^{-\alpha_t|x-t|} dt. \quad (10)$$

Струм стікання з залізничних рейок визначається згідно до виразу:

$$j_r = -\frac{dI_r}{dx} = \frac{\alpha_r I_n}{2} \eta e^{-\alpha_r(x-x_0)}, \quad (11)$$

де  $\eta = 1 - \frac{Z_k}{Z_r}$  - коефіцієнт екранування;  $Z_r$  - повний опір рейкової колії;  $Z_k = \frac{\omega\mu_0}{2} + i \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma D}$  - опір, зумовлений впливом контактної мережі на рейкові колії,  $D$  - відстань між контактною та рейковою мережами.

Струм стікання з підземного металевого трубопроводу, що знаходиться в зоні впливу струмів, що блукають визначається відповідно до виразу (12). Рівняння (12) забезпечує можливість встановлення впливу на підземні металеві циліндричні комунікації електрифікованого залізничного транспорту. Проте, підземні металеві трубопроводи знаходяться під впливом не тільки струмів, що блукають та електричних полів залізничного транспорту. Захист від електрохімічної корозії забезпечується електротехнічною системою катодного захисту [5, 6].

$$j_t = \frac{I_n \eta \alpha_r^2}{2\pi\sigma R_{per}' (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left( \left( \alpha_r + \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \right) \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r, y)} - \left( \alpha_t + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \right) \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t, y)} - \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r, y)} + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t, y)} \right). \quad (12)$$

де  $\Omega_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)}$  - функції розрахунку інтегральних виразів;  $I_n$  - струм зосередженого навантаження (локомотиву електрифікованого рейкового транспорту).

До системи входять станції катодного захисту (СКЗ), що зумовлюють наявність захисного потенціалу на об'єкті, який захищається. Це забезпечується шляхом подавання напруги за певним законом зміни як за часом так й в залежності від корозійного стану у навколишньому середовищі та у системи «металевий підземний трубопровід – ґрунт – СКЗ».

Сучасні СКЗ створені за високочастотним принципом перетворення сигналу (рис. 1). Головною перевагою їх є масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дозволяють інтегрувати ці СКЗ до загальних систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії [4].

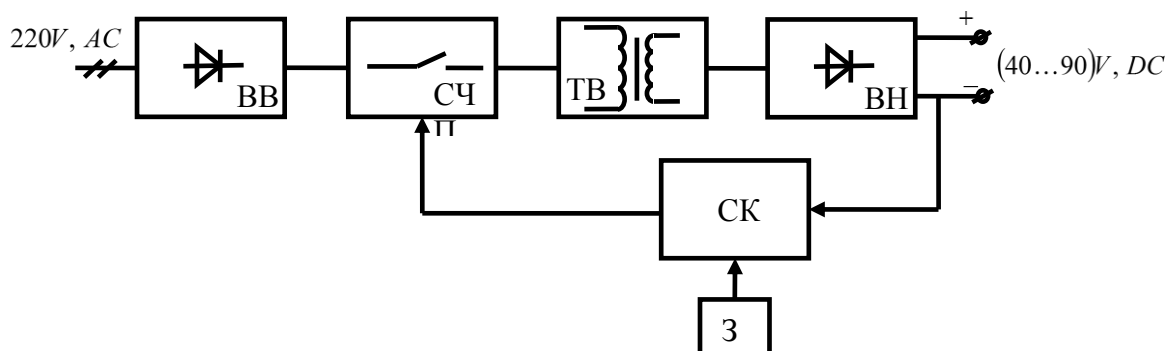


Рис. 1. Інверторний високочастотний випрямляч

Високовольтний випрямляч (ВВ) здійснює випрямлення напруги, яка за допомогою силового частотного перетворювача (СЧП) формується до змінної. Змінна напруга надходить до високочастотного трансформатора (ТВ), який перетворює рівень напруги до потрібного значення. Потім низьковольтний випрямляч (ВН) випрямляє напругу, що подається до підземного сталевому трубопроводу та анодного заземлювача. Система керування (СК) відпрацьовує сигнал завдання з блока (З) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СПЧ. Приймавши сигнал на виході СКЗ правильної прямокутної геометричної форми та розклавши його в ряд Фур'є, запишемо:

$$f(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos(2\omega t) - \frac{1}{3.5} \cos(4\omega t) + \frac{1}{5.7} \cos(6\omega t) - \dots \right) \quad (13)$$

Напругу на підземному сталевому трубопроводі, прийнявши схему заміщення трубопроводу як систему з розподіленими параметрами [2], можливо визначити згідно виразу [5]:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x)} + \dot{A}_2 e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x)}, \quad (14)$$

а струму, що протікає через трубопровід, як:

$$\dot{i} = -\frac{A_1}{z_v} e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x - \phi_v)} + \frac{A_2}{z_v} e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x) - \phi_v}, \quad (15)$$

де  $z_v$  – хвильовий опір, який визначається так:

$$z_v = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = z_v e^{j\psi_v}. \quad (16)$$

Здійснивши перехід від комплексних напруги та струму до функцій часу шляхом перемноження виразів (14) та (15) на величину  $\sqrt{2}e^{j\omega t}$  й взявши від добутку уявну частину, запишемо:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x) + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x), \quad (17)$$

де  $A_1, A_2$  – сталі інтегрування;  $\alpha$  – коефіцієнт згасання;  $\beta$  – коефіцієнт фази;  $\psi_0, \psi_p$  – фази хвилі що падає та хвилі, що є віддзеркаленням;  $x$  – відстань від точки підключення СКЗ.

Таким чином струм, що протікає через трубопровід:

$$i = \frac{A_1}{z_v} \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x - \psi_v) + \frac{A_2}{z_v} \sqrt{2} e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x - \psi_v). \quad (18)$$

Повний струм, що протікає трубопроводом, визначається як [7]:

$$I_t = \frac{I_n \alpha_r^2 \eta}{2\pi\sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left( \left( 1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \right) \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - \left( 1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \right) \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} + \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - i \frac{\gamma^2 (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)}{\alpha_t^2 \alpha_r^2} \times \ln \frac{y_1}{y} \frac{\left( \sqrt{(x-x_0)^2 + (x_0-x)} \right)}{\left( \sqrt{(x-x_0)^2 + y_1^2 + (x_0-x)} \right)} \right). \quad (19)$$

До виразу (19) входить значення струму  $I_n$ , що зумовлений зосередженим навантаженням на рейковій колії. Це зумовлює закон зміни струму стікання як за часом так й за довжиною трубопроводу (координатою  $x$ ) за умови відсутності інших збурень.

Повний струм трубопроводу, що зумовлений впливом як залізничним електрифікованим транспортом так й СКЗ на основі (18,19) визначається як:

$$I_t = \frac{I_n \alpha_r^2 \eta}{2\pi\sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left( \left( 1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \right) \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - \left( 1 + i \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \right) \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - i \frac{\gamma^2}{\alpha_t^2} \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} + \frac{\gamma^2}{\alpha_r^2} \Psi_{(\beta, (x_0-x), \beta, y)} - i \frac{\gamma^2 (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)}{\alpha_t^2 \alpha_r^2} \times \ln \frac{y_1}{y} \frac{\left( \sqrt{(x-x_0)^2 + (x_0-x)} \right)}{\left( \sqrt{(x-x_0)^2 + y_1^2 + (x_0-x)} \right)} \right) + \left( \frac{A_1}{z_v} \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x - \psi_v) + \frac{A_2}{z_v} \sqrt{2} e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x - \psi_v) \right). \quad (20)$$

Струм стікання з підземного металевого трубопроводу, що й є причиною корозійної руйнації комунікацій, визначмо на основі інформації про розподіл за довжиною трубопроводу (за координатою  $x$ ) напруги, що зумовлена впливом СКЗ (17). Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_t^p = R_t^{iz} + R_t^l. \quad (21)$$

де  $R_t^{iz}$  - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Повний опір трубопроводу визначається виразом:

$$Z_t = Z_{po} + \tilde{Z}_t. \quad (23)$$

Поверхневий опір трубопроводу визначається згідно виразу:

$$Z_{po} = \frac{(1-i)\gamma_t}{2\pi r_t \sigma_t} \operatorname{ctg}((1-i)\gamma_t h_t). \quad (24)$$

де  $h_t$  - товщина стінок трубопроводу.

Опір трубопроводу, що зумовлено впливом навколишнього середовища (грунту) визначається [7]:

$$\tilde{Z}_t = \frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t} \quad (25)$$

У першому приближенні, можливо знехтувати поверхневим опором трубопроводу для визначення струмів стікання з нього. Тоді струм стікання визначатиметься як:

$$j'_t = \frac{A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x) + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x)}{\frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}} \quad (26)$$

На основі (26) отримавши попередньо значення напруги за координатою  $x$ , визначмо значення струму стікання з трубопроводу, що зумовлено роботою СКЗ. Враховуючи (12, 26) запишемо вираз для повного струму стікання з підземного металевого трубопроводу, що одночасно знаходиться під впливом електрифікованого залізничного транспорту та СКЗ:

$$j_t = \frac{I_n \eta \alpha_r^2}{2\pi \sigma R_{per}^t (\alpha_r^2 - \alpha_t^2)} \left( \left( \alpha_r + \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \right) \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} - \left( \alpha_t + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \right) \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} - \frac{i\gamma^2}{\alpha_r} \Omega_{(\beta_r(x_0-x), \beta_r y)} + \frac{i\gamma^2}{\alpha_t} \Omega_{(\beta_t(x_0-x), \beta_t y)} \right) + \left( \frac{A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x)}{1} + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x) \right) \frac{1}{\frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t}} \quad (27)$$

**Висновки.** Вираз 27, на відміну від відомого, враховує складові струму стікання з підземного трубопроводу, що зумовлені основними джерелами збурень для підземних металевих комунікацій. Це дозволяє більш точно оцінювати корозійний стан та ефективність заходів з катодного захисту підземних металевих комунікацій.

#### Список використаних джерел

1. Склярів С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Склярів Станіслав Александрович. - Х., 2002 – 168с.
2. Азюковський О.О. Потенціал підземного металевого трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 18-22.
3. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
4. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевго трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
5. Вербенець Б. Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів: дис. кандидата технічних наук: 05.11.13 / Вербенець Богдан Ярославович. – Л., 2011. – 106 с.
6. Склярів С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Склярів Станіслав Александрович. - Х., 2002 - 168с.
7. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Бештою О.С.*