

*Бондар В.О., д.т.н., професор*

*Бондар Л.В., к.т.н., доцент*

*Горшеніна А.О., студент*

*Гвоздь А.В., студент*

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

## **УЛАШТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ ІЗ ЗБІРНИХ РЕБРИСТИХ ПЛИТ**

*Запропоновано систему та розрахунок системи електрохімічного (катодного) захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів із ребристих плит вітчизняного виробництва. Електрохімічний захист арматури передбачено від зовнішнього джерела постійного струму. Арматуру (катод) приєднано до негативного полюса джерела живлення струму, анод – до позитивного полюса джерела струму. З'ясовано, що особливістю конструктивного рішення системи даного захисту є використання поздовжніх монтажних швів між суміжними плитами для розміщення лінійних анодів, що дозволяє знизити трудомісткість робіт з улаштування захисту. Розроблено метод розрахунку електрохімічного (катодного) захисту робочої арматури.*

**Ключові слова:** *залізобетонна плита, арматура, катодний захист.*

*Бондарь В.А., д.т.н., профессор*

*Бондарь Л.В., к.т.н., доцент*

*Горшенина А.А., студент*

*Гвоздь А.В., студент*

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

## **УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ЕЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ИЗ СБОРНЫХ РЕБРИСТЫХ ПЛИТ**

*Предложена система и расчет системы электрохимической (катодной) защиты от коррозии арматуры железобетонных перекрытий из ребристых плит отечественного производства. Электрохимическая (катодная) защита предусматривается от внешнего источника постоянного тока. Арматура (катод) присоединена к отрицательному полюсу источника тока, анод – к положительному полюсу источника тока. Выяснено, что особенностью конструктивного решения системы данной защиты является использование продольных монтажных швов между смежными плитами для размещения линейных анодов, что позволяет снизить трудозатраты работ по устройству защиты. Разработан метод расчета электрохимической (катодной) защиты рабочей арматуры.*

**Ключевые слова:** *железобетонная плита, арматура, катодная защита.*

Bondar V., DSc, Professor  
Bondar L., PhD, Associate Professor  
Gorshenina A., student  
Gvozd A., student

*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

## **DESIGN AND CALCULATION OF ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF REINFORCEMENT CORROSION FOR PREFABRICATED REINFORCED CONCRETE OVERLAP CONSISTIN OF RIBBED PLATES**

*Increased incidence of corrosion damages of reinforced concrete structures requires the introduction of advanced technologies to protect them from corrosion. One of fundamental methods in solving this problem is electrochemical protection for reinforcement. It is the most effective according to data foreign specialists.*

*The developed system of electrochemical (cathodic) protection of reinforcement in the foreign practice adapted for use in monolithic over ground concrete structures. In these conditions complicated questions anodes fixing to the structure. In addition, cathodic protection systems, calculations are approximate.*

*The paper deals with a constructive solution and calculation systems of electrochemical cathodic corrosion protection reinforcement prefabricated concrete overlap consisting of ribbed plates. The electrochemical (cathodic) protection is provided by an external power source.*

*Reinforcement (cathode) is connected to negative pole of power source. The anode is connected to positive pole of power source. Working reinforcement ribs of reinforced concrete plates should be protected as a basic element, which provides load capacity plate.*

*Using the longitudinal mounting joints between adjacent plates to accommodate the linear anodes (wires) is a feature of a constructive solution of this system of protection. The joint is released from solution to depth of laying line anode. The anode is covered with a protective coating after fixing in the joint.*

*This solution allows reducing the volume of work involved with the protection device.*

*The calculation method of electrochemical (cathodic) protection of the working reinforcement is designed. The problem of determining parameters of electrochemical (cathodic) protection can be formulated as follows: find location of the anode scheme, find electric current capacity of power source on surface of reinforcement of the protective potential within the prescribed limits.*

*The main parameters for the calculation of potential the shear are: the power supply current, the cathodic polarization of reinforcement below the concrete cover, the electric conductivity of concrete and location of reinforcement relative to the anode.*

*To calculate the power source used special parameters - spreading resistance of the anode and transfer resistance reinforcement.*

*An example of calculating system working cathodic protection of reinforcement in longitudinal ribs of reinforced concrete plates. Conclusions are formulated and the use of literary sources are listed.*

**Keywords:** *reinforced concrete plate, reinforcement, cathodic protection.*

**Вступ.** Останнім часом збільшуються випадки уражень залізобетонних конструкцій у результаті виникнення і розвитку в них процесів корозії арматури. Це вимагає більш інтенсивного впровадження прогресивних технологій захисту від корозії арматури залізобетонних конструкцій.

Одним із кардинальних методів у розв'язанні цієї задачі є електрохімічний захист. За даними закордонних спеціалістів [1] електрохімічний (катодний) захист визнаний найбільш дієвим методом запобігання корозії арматури в залізобетонних конструкціях.

В останні 30 років захист широко використовується в закордонній практиці для запобігання корозії арматури залізобетонних конструкцій будівель та споруд [2].

Серед перших розробників катодного захисту арматури залізобетонних конструкцій називають ім'я американця Річарда Стратфула, який створив основні стандарти з катодного захисту. Відомий закордонний спеціаліст Беркелей [3] представляє катодний захист як практично єдиний засіб припинення корозії арматури залізобетонних конструкцій у процесі експлуатації.

**Актуальність** упровадження електрохімічного захисту обумовлена його позитивними характеристиками. До них відносять: високу ефективність, доступність, простоту у використанні, безпеку для навколишнього середовища та ін.

Для вітчизняної практики електрохімічний захист арматури надземних залізобетонних конструкцій, у тому числі й перекриттів, є новим. Для впровадження електрохімічного захисту необхідні конструктивні опрацювання та розрахунок таких систем для вітчизняних умов будівництва й експлуатації залізобетонних конструкцій.

**Аналіз основних джерел досліджень і публікацій.** Для катодного захисту від корозії арматури залізобетонних перекриттів у закордонній практиці розроблені різні конструктивні системи та улаштування. Наведемо декілька характерних рішень катодного захисту арматури, близьких до розробленого авторами цієї статті.

Запропоновано катодний захист арматури залізобетонного перекриття, в якому поряд зі сталеву арматурою влаштовуються спеціальні канали для розміщення анодів [4]. Після монтажу лінійних анодів канали заповнюють пінобетоном.

Подібне рішення запатентовано в США, воно вирізняється довговічними лінійними анодами з ніобієвого дроту [5].

Катодний захист арматури залізобетонних перекриттів знайшов використання в будівництві багатоярусних автостоянок у Чехії [6].

Спеціалісти з Норвегії розробили ряд систем для катодного захисту арматури при ремонті залізобетонних конструкцій [7]. Гнучкий полімерний анод монтується на арматурі за допомогою ізолюючого пластикового затискача.

Значну роботу з виконання антикорозійного захисту арматури було виконано при реконструкції залізобетонного перехресно-ребристого монолітного перекриття підземного гаража в м. Колумбус (штат Огайо), де після 23-х років експлуатації виявлена значна корозія робочої арматури полиць плит і їх ребер [8].

Установленню анодів передувало очищення бетонної поверхні струменем води під великим тиском з метою видалення фарби. Аноди діаметром біля 8 мм, довжиною 90 м були виготовлені у вигляді пасма з мідних дротинок.

Аноди закріплювали у затискачах із пластмаси, які не проводять електричний струм. Між затискачами й нижніми гранями ребер надопірних ділянок розташовували прокладки товщиною 1 см з акрилату.

Кріплення затискачів і прокладок до ребер плити виконувалося за допомогою спеціальних штирів із пластмаси, які установлювались у заздалегідь заготовлені отвори. Знизу аноди покривали шаром полімер-розчину.

Загальним недоліком улаштування систем катодного захисту арматури в наведених прикладах залишається досить висока трудомісткість. З'являється необхідність

використання спеціальних затискачів для вкладання анодів, кріплення самих затискачів на бетонній поверхні конструкції та ін.

При всьому різноманітті систем катодного захисту кожна з них пристосована до умов захисту, хоча всі будуються на загальних принципах.

Одним із важливих принципів при створенні систем катодного захисту є забезпечення розподілу захисного потенціалу на арматурі.

Для розрахунку захисних потенціалів при електрохімічному захисті металевих елементів від корозії використовують різні методи. Їх можливо розділити на дві групи.

До першої групи відносять методи, які полягають у заміні задачі розрахунку поля електричного струму в деякому електричному ланцюгові [9].

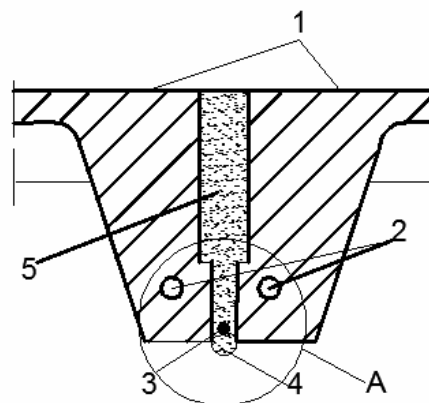
До іншої групи відносять методи, що ґрунтуються на заміні крайової задачі теорії поля в кусково-однорідному середовищі еквівалентною задачею для однорідного середовища [10]. У цих методах наближено враховуються властивості середовища, у якому виконується захист.

У строгій постановці задача розрахунку електрохімічного захисту від корозії металів, як крайова задача математичної фізики, запропонована в працях інших авторів [11]. Але такий підхід не реалізований для розрахунку електрохімічного захисту від корозії арматури перекриттів із збірною залізобетону. Механізм утворення захисного поля в цих конструкціях є досить специфічним.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Відомі системи електрохімічного (катодного) захисту надземних залізобетонних конструкцій, що використовуються, головним чином, у зарубіжній практиці, не пристосовані для використання в збірних залізобетонних конструкціях. Урахування ж конструктивних рішень таких систем дозволять знизити трудовитрати на їх катодний захист. Є необхідність також у розробленні методів розрахунку такого захисту з урахуванням особливостей вітчизняних збірних залізобетонних конструкцій.

**Метою** роботи є розроблення системи та методу розрахунку катодного захисту арматури залізобетонних перекриттів із збірних ребристих плит.

**Основний матеріал і результати.** Найбільш доцільним конструктивним рішенням улаштування електрохімічного захисту арматури в перекриттях із залізобетонних ребристих плит є рішення, коли в поздовжні шви між плитами паралельно арматурі вкладаються лінійні аноди у вигляді, наприклад, металевого дроту (рис. 1).



**Рисунок 1 – Фрагмент поздовжнього шва між ребрами залізобетонних плит з катодним захистом робочої арматури:**

- 1 – залізобетонна плита; 2 – робоча арматура; 3 – анод;
- 4 – захисне покриття; 5 – монтажний шов між плитами

Анод приєднується до позитивного полюса джерела струму, а арматура – до негативного джерела струму. Утворене електричне поле між анодом і катодом (арматурою) створює необхідну для зрушення потенціалу щільність струму на арматурі й гальмує корозійні процеси на ній.

Метою розрахунку стаціонарних полів при проектуванні систем катодного захисту є установлення залежності зсуву потенціалу на поверхні, що захищається, від розташування анодів при відомих геометричних і електрохімічних параметрах конструкцій, а також заданій силі струму.

У закордонній практиці для розрахунків катодного захисту арматури надземних конструкцій більше використовують емпіричні залежності, а необхідну силу захисного струму визначають пробними включеннями систем захисту.

У вітчизняній практиці відсутні методики для розрахунків катодного захисту арматури таких конструкцій.

Сучасна математика дозволяє перейти до розроблення методів розрахунку захисного потенціалу, які базуються на строгій постановці задач електрохімічного захисту як крайових задач математичної фізики. Такий підхід у розв'язанні подібних задач пропонує ряд авторів [11, 12]. На їх основі з урахуванням умов використання і було розроблено метод, що пропонується.

Задача зведена до інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу електричного поля

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

з граничними умовами, які мають вигляд

$$(U - \kappa \frac{\partial U}{n})_s = 0, \quad (2)$$

де  $U$  – зсув захисного потенціалу від значень стаціонарного потенціалу металу арматури в умовах експлуатації, В;

$k = \epsilon_\kappa \times \gamma$  – параметр поляризації;

$\epsilon_\kappa$  – катодна поляризація металу арматури, Ом·м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – питома електропровідність бетону плити, Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>;

$s$  – поверхня арматури, що захищається, м<sup>2</sup>;

$n$  – зовнішня нормаль до поверхні  $s$ .

Потенціал електрополя представлений виразом [13]

$$U = I \cdot \kappa B_3 / 4\pi\gamma, \quad (3)$$

$$\text{де } B_3 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{nQ \cdot \cos \Theta}{r + kn} \left(\frac{z}{p}\right)^n; \quad z = \frac{r^2}{R};$$

$R$  – координата точки розташування джерела струму;

$I$  – сила захисного струму, А/пог. м;

$P, \theta$  – полярні координати;

$Q$  – поліном Лежандра другого роду [14].

Після розрахунку  $B_3$  отримано залежність для розрахунку зсуву потенціалу при катодному захисті арматури

$$U = \frac{I \cdot kz}{2\pi\gamma(r+k)} - \left(\cos \Theta - \frac{z}{r} \cdot \frac{r+k}{r+2k}\right). \quad (4)$$

Зсув поляризаційного потенціалу тільки на 100 мВ зменшує швидкість корозії арматури на 80 – 90%.

Для розрахунку потужності джерела живлення та його напруги необхідно оцінити опір зовнішнього ланцюга «анод – катодна поверхня».

Опір розтікання лінійного анода круглого перерізу, укладеного у поздовжні шви паралельно робочій арматурі на деякій глибині від поверхні перекриття, може бути розрахований за формулою

$$R_a = \frac{\rho_b}{2\pi d} \ln \frac{l^2}{dt} , \quad (5)$$

де  $\rho_b$  – питомий електричний опір бетону, Ом·м;

$l$  – довжина анода, м;

$d$  – діаметр анода, м;

$t$  – глибина закладання анода у поздовжньому шві, м.

Перехідний опір катода (арматури) залежить від поляризаційного опору  $\vartheta_k$  і площі катодної поверхні  $s$

$$R_k = \frac{\vartheta_k}{s} . \quad (6)$$

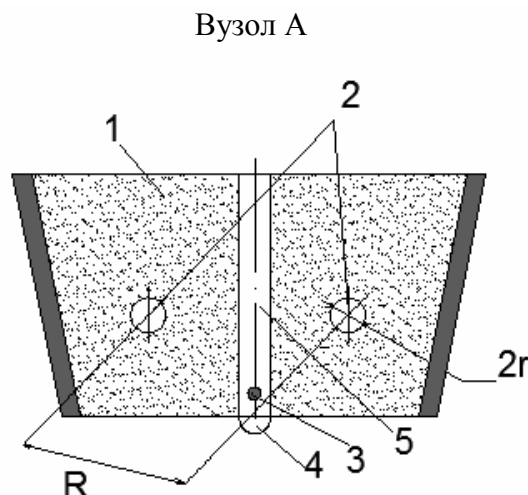
Розрахувавши повний опір зовнішнього ланцюга ( $R$  – опір розтікання анода і перехідний опір катода), знаходять напругу на клеммах джерела живлення

$$V = I \cdot R, \text{ В.} \quad (7)$$

Потужність джерела живлення

$$W = I \cdot V, \text{ Вт.} \quad (8)$$

**Приклад розрахунку захисного струму.** На рисунку 2 наведено розрахункову схему системи катодного захисту робочої арматури плит.



**Рисунок 2 – Розрахункова схема катодного захисту:**

1 – залізобетонна плита; 2 – робоча арматура; 3 – анод;

4 – захисне покриття; 5 – монтажний шов між плитами

**Вихідні дані:**  $r = 0,016$  м;  $\epsilon_k = 4$  Ом·м<sup>2</sup>;  $R = 0,05$  м;  $\gamma = 0.00025$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>

$$\kappa = b_k \times \gamma = 4 \times 0,00025 = 0,001;$$

$$Z = \frac{z^2}{R} = \frac{0,016^2}{0,05} = 0,005;$$

$$U = 0,1 \text{ В.}$$

Із залежності (1) може бути розрахований необхідний струм для зсуву потенціалу на 0,1 В

$$\frac{U}{I} = \frac{0,001 \times 0,005 \times 2}{2 \times 3,14 \times 0,00025 \times 0,016 (0,016 + 0,001)} \times \left(1 - \frac{0,005}{0,016} \times \frac{0,016 + 0,01}{0,016 + 2 \times 0,01}\right) = 16,36,$$

тоді необхідний струм

$$I = \frac{0,1}{16,36} = 0,006 \text{ А/м.}$$

**Висновки.** Запропоновано систему катодного захисту робочої арматури в ребристих залізобетонних перекриттях, яка враховує конструктивні особливості такого перекриття та зменшує трудозатрати при її влаштуванні. Отримано залежність, яка дозволяє розрахувати розподіл захисного потенціалу на поверхні поперечного перерізу арматурного стрижня, виявити вплив параметрів, що входять до залежності. Наведено формули для розрахунків напруги джерела живлення та його потужності.

#### Література

1. Menning D. G. Corrosion of metals in concrete / D. G. Menning // J. of the American concrete institute. – 1985. – Vol. 82, № 1. – P. 3 – 32.
2. Tighe M. R. Cathodic protection leads charge in corrosion battle / M. R. Tighe // Rublic Works. – 1990. – Vol. 120, № 8. – С.56 – 58.
3. Berkeley K. G. Catodik protection of Reinforcement steel inconcrete / K. G. Berkeley // Butterwarth. – 158 p.
4. Патент Данія 101493, МКИ С 23 f, 13/00, заявл. 1964 г.
5. Патент США 4255241, МКИ С 23 f, 13/00, заявл. 1979 г.
6. Simecek V. Katodova ochrana zelesobetonavych konatrukci vicepoolaznich parkovist / V. Simecek // Inz.Stavby. – 1991. – Vol. 39, № 2. – С. 53 – 55.
7. Berthagen L. Katodiskt skydd av armering i betongkonstruktioner / L. Berthagen // Nerdisk Betong. – 1989. – № 5. – С.31 – 39.
8. Cathodik protection for overhead construction // Concrete censtruktion. – 1987. – Vol. 32. – № 2. – P. 193 – 195.
9. Лорткипанидзе Б. Г. Защита подземных металлических сооружений от коррозии / Б. Г. Лорткипанидзе. – М. : Гостехиздат, 1957.
10. Стрижевский И. В. Защита подземных сооружений от коррозии / И. В. Стрижевский. – М. : Гостехиздат, 1966.
11. Иоссель В. А. Электрические поля постоянных токов / В. А. Иоссель. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.
12. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите металлических сооружений от коррозии / В. Н. Остапенко, Ф. Н. Жапакова, В. В. Лукович и др. – К. : Наукова думка, 1980. – 294 с.
13. Иоссель Ю. Я. Исследование метода отображений для расчета стационарных электрических полей / Ю. Я. Иоссель, Е. А. Свядош. – Л. : Электричество, 1981. – № 4. – С. 67 – 68.
14. Прудников А. П. Интегральные ряды. Специальные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Бричков, О. Н. Марычев. – М. : Наука, 1983. – 750 с.

### References

1. Menning D. G. Corrosion of metals in concrete / D. G. Menning // *J. of the American concrete institute*. – 1985. – Vol. 82, № 1. – P. 3 – 32.
2. Tighe M. R. Cathodic protection leads charge in corrosion battle / M. R. Tighe // *Rublic Works*. – 1990. – Vol. 120, № 8. – C.56 – 58.
3. Berkeley K. G. Catodik protection of Reinforcement steel in concrete / K. G. Berkeley // *Butterwarth*. – 158 p.
4. Patent Daniya 101493, MKI S 23 f, 13/00, zayavl. 1964 g.
5. Patent SShA 4255241, MKI S 23 f, 13/00, zayavl. 1979 g.
6. Simecek V. Katodova ochrana zelesobetonavych konatrukci vicepoolaznich parkovist / V. Simecek // *Inz.Stavby*. – 1991. – Vol. 39, № 2. – C. 53 – 55.
7. Berthagen L. Katodiskt skydd av armering i betongkonstruktioner / L. Berthagen // *Nerdisk Betong*. – 1989. – № 5. – S.31 – 39.
8. Cathodik protection for overhead construction // *Concrete censtruktion*. – 1987. – Vol. 32. – № 2. – P. 193 – 195.
9. Lortkipanidze B. G. Zashchita podzemnyh metallicheskih sooruzheniy ot korrozii / B. G. Lortkipanidze. – M. : Gostehizdat, 1957.
10. Strizhevskiy I. V. Zashchita podzemnyh sooruzheniy ot korrozii / I. V. Strizhevskiy. – M. : Gostehizdat, 1966.
11. Iossel V. A. Elektricheskie polya postoyannyh tokov / V. A. Iossel. – L. : Energoatomizdat, 1986. – 160 s.
12. Metody rascheta elektricheskih poley pri elektrohimicheskoy zashchite metallicheskih sooruzheniy ot korrozii / V. N. Ostapenko, F. N. Zhapakova, V. V. Lukovich i dr. – K. : Naukova dumka, 1980. – 294 s.
13. Iossel Yu. Ya. Issledovanie metoda otobrazheniy dlya rascheta statsionarnykh elektricheskih poley / Yu. Ya. Iossel, E. A. Svyadosh. – L. : Elektrichestvo, 1981. – № 4. – S. 67 – 68.
14. Prudnikov A. P. Integralnye ryady. Spetsialnye funktsii / A. P. Prudnikov, Yu. A. Brichkov, O. N. Marychev. – M. : Nauka, 1983. – 750 s.

© Бондар В.О., Бондар Л.В., Горшеніна А.О., Гвоздь А.В.  
Надійшла до редакції 17.05.2016