

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗРІЛОСТІ БЕТОНУ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА

*Євген Походило, д.т.н. проф., Микола Флінта, аспірант
Національний університет «Львівська політехніка», Україна,
e-mail: yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua, mykola.y.flinta@lpnu.ua*

Анотація

В роботі проаналізовано метод ідентифікації зрілості бетону за результатами вимірювання температури бетону в процесі його досягання завдяки вбудованого в бетон сенсора температури. Таким методом здійснюється контроль зрілості бетону опосередковано. Авторами пропонується спосіб контролю зрілості бетону за результатами безпосереднього вимірювання його електричних параметрів з використанням вбудованого в бетон триелектродного ємнісного сенсора. Отримані результати вимірювань порівнюються з відповідними параметрами електричного стандартного зразка бетону, сформованого у лабораторних умовах його дозрівання. Особливістю роботи є те, що завдяки конструктивним параметрам сенсора контролюється лише бетон без наповнювача. Це забезпечує інваріантність результатів вимірювання електричних параметрів до неоднорідності бетону, зумовленої різними співвідношеннями компонентів в зоні контролю. Застосування триелектродного сенсора також усуває недоліки вбудованого в бетон двоелектродного сенсора через вплив на результат вимірювання крайових ефектів. Контрольований об'єм бетону формується заданими розмірами отвору третього електрода, який розташовано між двома робочими електродами. Наводиться алгоритм практичної реалізації такого способу в реальних умовах дозрівання бетону. При цьому вимірюються еквівалентна ємність та активна провідність адмітансу бетону. За отриманими результатами знаходяться діелектрична проникність та питома провідності бетону за сталих розмірів триелектродного ємнісного сенсора.

Ключові слова

Адмітанс, частота, якість, зрілість бетону, ідентифікація, випробування, стандартний зразок, питомий опір, діелектрична проникність

1. Вступ

Багато субпідрядників будівельних робіт нехтують рекомендаціями і нормативними документами, а також недоброякісно виконують роботи, пов'язані з доглядом зрілості бетону. Це призводить до появи тріщин, причини яких субпідрядник намагається списати на якість бетону. Такі звинувачення тягнуть за собою тривалі суперечки, додаткові збитки на придбання ремонтних сумішей, і навіть втрату клієнта. Як відомо, одним із основних параметрів бетону є його міцність, що досягається його зрілістю. Зрілий бетон повинен відповідати міцності відповідно до вимог галузевих нормативних документів. Особливо це стосується бетону під час будівництва, зокрема виготовлення бетонного перекриття в багатоповерхових будинках. Своєчасна ідентифікація зрілості бетону скорочує терміни будівництва, зменшує витрати на оренду засобів опалубки та забезпечує надійність перекриття. Саме тому постановка завдання щодо вдосконалення методів ідентифікації зрілості бетонного перекриття є актуальним.

2. Недоліки

В Україні почала діяти система сучасного температурного моніторингу “Maturix”, яка відстежує в режимі реального часу температуру бетону під час його застигання. Глобальний оператор почав працювати з січня 2021 року. Мережа найширше використовується у житлово-комунальній сфері для цифрового обліку комунальних ресурсів, у будівельній галузі для контролювання дозрівання бетону, у логістиці для відстеження рухомого складу, у сільському господарстві для покращення врожаю. Наразі, мережа забезпечує 25% покриття населення України, та діє в Київській, Харківській, Дніпропетровській, Одеській, Полтавській, Черкаській областях. Система реалізує метод ідентифікації зрілості бетону в реальному часі під час будівництва [1]. Тому система “Maturix” надає можливість контролюватися процес на всіх етапах дозрівання бетону. В результаті отримуємо якісно виконану конструкцію та задоволених споживачів. Метод ґрунтується на результатах вимірювання зміни температури бетонних елементів з використанням сенсорів температури, які вбудовані в бетон. Зміна температури бетону під час процесу дозрівання відстежується в режимі реального часу. Процедура випробування була стандартизована в ASTM C1074 – 19. Індекс зрілості використовується для порівняння результатів випробувань на зрілість із міцністю на стискання бетону, отриманих із зразків циліндрів, дозрілих у лабораторних умовах. Отримані співвідношення можна використовувати для моніторингу розвитку міцності свіжого бетону та бетону раннього віку. Це дозволяє уникати температурних тріщин, які зменшують термін експлуатації конструкції та ведуть до додаткових витрат на ремонт. Така система забудовникам дає змогу відстежувати дозрівання бетону в режимі реального часу, зменшити витрати на ремонт тріщин, які виникли через недотримання температурного режиму, зменшення витрат на опалення та покращення якості конструкції та терміну її експлуатації.

Недоліком такого методу ідентифікації зрілості бетону під час будівництва за результатами вимірювання температури здійснюється опосередковано на основі теоретичних розрахунків, що може не співпадати з реальними результатами. Точність реалізації такого методу значною мірою залежить від неточності початкових даних вимірювань, непослідовності збору даних тощо. Разом з тим, такий метод контролю передбачає однакові умови протягом усього терміну дозрівання бетону. Однак зміни середовища або параметрів процесу дозрівання можуть впливати на результати, а за суттєвих змін результати можуть бути неправильними. Це вимагає ретельного повторного калібрування та забезпечення високоякісного збору даних.

Відомі з літературних джерел також методи вимірювання електричних параметрів бетону (електричного опору бетону) з метою контролювання його міцності. Реалізуються такі методи через прикладання електродів двоелектродного ємнісного сенсора до зразка зрілого бетону безпосередньо [2-8] або вбудовуванням двоелектродного ємнісного сенсора з круглим перерізом електродів у свіжий бетон [9]. Недоліком таких вимірювань є вплив крайових ефектів двоелектродного ємнісного сенсора [10] на визначення питомих опору чи провідності бетону.

3. Мета роботи

Мета роботи полягає у створенні методу оперативного контролю зрілості бетону під час будівництва в реальних умовах за результатами вимірювання інформативних електричних параметрів адмітансу бетону, що відображають його питому провідність та діелектричну проникність.

4. Спосіб контролю зрілості бетону за електричними параметрами та його реалізація

4.1 Спосіб вимірювання електричних параметрів бетону

Суть запропонованого способу полягає в тому, що протягом дозрівання бетону здійснюються безпосередні вимірювання активної та реактивної компонент його адмітансу. Вони відображають, як відомо [11], провідність та діелектричну проникність контрольованого бетону, що змінюються у процесі дозрівання. Разом з тим, оскільки бетон містить водяний розчин з піском та цементом, а також наповнювач у вигляді гравію, то кожен компонент зокрема та їхнє співвідношення безпосередньо впливають на електричні параметри бетону. Через обмежені розміри ємнісного сенсора співвідношення рідкої маси бетону та гравію може бути різним і відповідно отримуємо різні результати вимірювання. Зазначимо, що марка бетону, а відповідно, його міцність визначається, в основному, маркою цементу та співвідношення його з піском. З урахуванням зазначеного авторами пропонується вимірювати електричні параметри саме такої частини бетону. Щоб забезпечити таке вимірювання необхідно відокремити гравій від цементної маси бетону. Для цього пропонується використати ємнісний сенсор таких розмірів, завдяки яким гравій не попадатиме у міжелектродний простір сенсора. Тобто, міжелектродна відстань сенсора повинна бути меншою від розмірів гравію. Тим самим також забезпечується вища чутливість сенсора, оскільки зменшується відстань між електродами.

Окрім цього, для забезпечення інваріантності результату від впливу крайових ефектів, що властиве ємнісним сенсорам двоелектродної конструкції, пропонується додаткове використання третього електрода, розміщеного між двома робочими електродами з фіксованою міжелектродною відстанню. У разі використання третього електрода з отвором можна сформувати активну площу робочих електродів ємнісного сенсора. Така площа визначатиметься фіксованими розмірами отвору третього електрода. Всі три електроди в процесі монтування в бетон повинні забезпечувати контакт на поверхні перекриття для під'єднання вимірювального засобу. Це дає змогу контролювати зазначені вище електричні параметри бетону заданого об'єму в процесі його дозрівання. За отриманими результатами вимірювання активної та реактивної компоненти адмітансу бетону можна розрахувати питому провідність бетону та його діелектричну проникність.

Отримані результати вимірювання порівнюються з відповідними параметрами стандартного зразка такого ж бетону. За результатами порівняння оцінюється рівень його зрілості. У такому разі відносні показники якості Q_1 , Q_2 записуються відношеннями:

$$Q_1 = \frac{\text{Im}(Y_x)}{\text{Im}(Y_0)} = \frac{C_x}{C_0} = \frac{A_x e_x}{A_0 e_0} = \frac{e_x}{e_0}, \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{\text{Re}(Y_x)}{\text{Re}(Y_0)} = \frac{G_x}{G_0} = \frac{A_x s_x}{A_0 s_0} = \frac{s_x}{s_0}, \quad (2)$$

де $Y_x = \omega C_x$ та $Y_0 = \omega C_0$ - адмітанси контрольованого об'єкта та електричного стандартного зразка, відповідно на частоті ω тестового сигналу;

C_x та C_0 та G_x та G_0 - еквівалентні ємності та провідності адмітансів контрольованого об'єкта та електричного стандартного зразка, відповідно на частоті ω тестового сигналу;

ϵ_x , ϵ_0 та S_x , S_0 - діелектричні проникності та питомі провідності контрольованого бетону та електричного зразка бетону, відповідно.

A_1 та A_2 - сталі ємнісних сенсорів вбудованих у контрольований бетон та стандартний зразок бетону.

За умови $Q_1 \ll 1$ та $Q_2 \ll 1$ контрольований бетон відповідає заданому рівню стиглості. За інших умов необхідно продовжити час досягання бетону з подальшим вимірюванням зазначених електричних параметрів.

4.2. Реалізація запропонованого способу контролю зрілості бетону

Для реалізації способу контролю зрілості у свіжий бетон підчас бетонування перекриття вбудовують триелектродний ємнісний сенсор з металевими електродами заданих геометричних розмірів. Тобто, в міжелектродному просторі знаходиться контрольований бетон, що утворює при цьому імпеданс (адмітанс) ємнісного характеру з активною та реактивною компонентами. Для цього використовується сенсор з електродами плоскопаралельної конструкції. Геометричні розміри такого ємнісного сенсора (площа та міжелектродна відстань) формують сталу ємнісності сенсора. Вимірювання зазначених електричних параметрів бетону необхідно використати відповідний вимірювальний прилад, який забезпечить відповідне під'єднання вбудованого в бетон триелектродного сенсора. Для отримання відносних показників якості (1) та (2) прилад має забезпечити режим вимірювання ємності та провідності, як реактивної та активної компонент адмітансу бетону. Таким вимогам, зокрема відповідає портативний вимірювач параметрів імітансу Е7-13. Він дозволяє безпосередньо вимірювати еквівалентну ємність, як реактивну компоненту, та провідність, як активну компоненту адмітансу на частоті 1кГц тестового синусоїдного сигналу заданого амплітудного рівня..

Як зазначалося вище, отримані результати вимірювання компонент адмітансу бетону порівнюють з відповідними значеннями компонент електричного стандартного зразка. Такий зразок являє собою зразок бетону такої ж марки і за такою ж технологією виготовлення з вбудованим ємнісним сенсором аналогічного конструктивного виконання. При цьому нормована зрілість бетону досягається в лабораторних умовах і вимірюються зазначені параметри аналогічно. Тим самим отримуємо електричний стандартний зразок бетону з нормованими значеннями відповідних електричних параметрів за вказаних температурних умов. З метою врахування впливу температури на електричні параметри контрольованого бетону можна додатково із вбудованим триелектродним сенсором також вбудувати сенсор температури або помістити стандартний зразок в умовах дозрівання бетону. Для реалізації запропонованого способу контролювання зрілості бетону, як зазначалося вище, на рис.1 наведено спрощене конструктивне виконання вбудованого в бетон триелектродного сенсора плоскопаралельної конструкції.

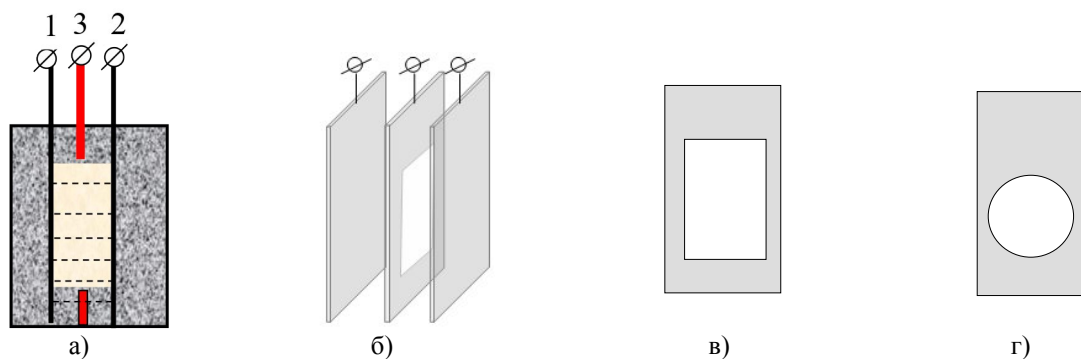


Рис. 1. Конструктивне виконання триелектродного ємнісного (а) сенсора та форма захисного електрода (б, в, г)

Особливістю такого сенсора є те, що в ньому використано третій електрод 3 (рис.1а) (переважно його називають захисним електродом). Він розміщений між робочими електродами 1, 2 (рис.1б) і має отвір прямокутної (рис.1.в) або круглої форми (рис.1г). Саме завдяки цьому формується активна площа робочих електродів за сталої відстані між ними. Таким способом усувається недолік двохелектродних сенсорів, зумовлений впливом крайових ефектів. Це дає змогу сформувати заданий об'єм бетону, який є об'єктом контролю його електрофізичних параметрів. Еквівалентні електричні схеми такого вбудованого в бетон триелектродного сенсора наведені на рис.2.

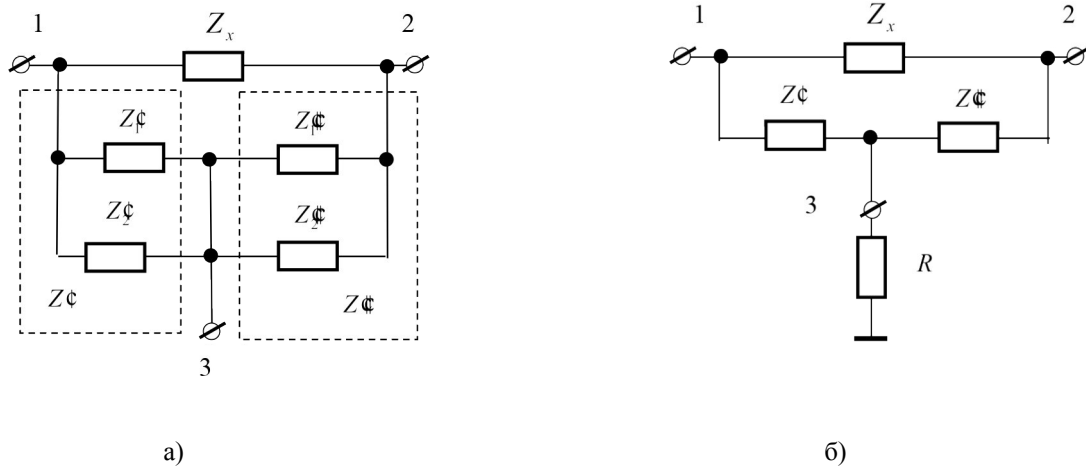


Рис. 2. Еквівалентні електричні схеми триелектродного сенсора, вбудованого в бетон:

а) загальна схема; б) спрощена схема

Схема (рис.2а) відображає всі види імпедансів (інформативний та неінформативний) такого об'єкта контролю. Неінформативний імпеданс містить імпеданс, утворений імпедансами Z_ϕ та Z_ϕ між робочими електродами 1, 2, відповідно, та захисним електродом 3. Зумовлений зазначений неінформативний імпеданс імпедансом ізоляційних матеріалів сенсора Z_1 (Z_ϕ та Z_ϕ), об'ємним та поверхневим імпедансом Z_2 (Z_ϕ та Z_ϕ бетону, зумовленого крайовими ефектами сенсора. У разі використання двоелектродного ємнісного, як відомо, зазначений неінформативний імпеданс шунтує інформативний імпеданс бетону Z_x . Це призводить до виникнення похибок вимірювання. Однак, якщо використати триелектродне під'єднання, то шунтуюча дія зазначеними неінформативними імпедансами практично зводиться до нуля [10]. У такому разі спрощена еквівалентна схема такого сенсора з урахуванням зазначеного вже має вигляд, зображений на рис.2в (імпеданс Z_ϕ , що охоплює імпеданси Z_ϕ , Z_ϕ та Z_ϕ імпедансами Z_ϕ , Z_ϕ).

У такому разі сумарний неінформативний імпеданс Z_p між робочими електродами (1, 2) визначається за відомою формулою

$$Z_p = Z_\phi + Z_\phi + \frac{Z_\phi Z_\phi}{R}, \quad (3)$$

а за умови $R \rightarrow 0$ імпеданс $Z_p \rightarrow \infty$, чим забезпечується інваріантність до неінформативного імпедансу.

Отже, зазначеним вище вимірювальним приладом вимірюються параметри імпедансу бетону, який розміщений у міжелектродному просторі такого сенсора фіксованого об'єму. При цьому триелектродним сенсором усуємо зазначені вище неінформативні імпеданси, а саме:

- імпеданс ізоляційних конструкцій сенсора для з'єднання електродів;
- можливість контролювати зрілість бетону всередині перекриття на будь-якій відстані від поверхонь;
- імпеданс, зумовлений крайовими ефектами та паразитною ємністю під'єднувальних дротів, якими сенсор з'єднується із вимірювальною схемою.

Окрім цього є можливість:

- виокремити рідку фазу бетону, усунувши вплив електричних параметрів гравію;
- сформувати заданий об'єм бетону, що визначається розміром отвору захисного електрода та міжелектродною відстанню робочих електродів.

5. Висновки

Запропонований спосіб дає змогу безпосередньо контролювати якість бетонного перекриття за результатами вимірювання електричних параметрів. Такими параметрами є реактивна та активна компоненти адмітансу контролюваного бетону, які відображають його діелектричну проникність та питому провідність. Отримують зазначені параметри через вимірювання еквівалентної ємності та провідності, як параметрів адмітансу бетону. Використання триелектродного ємнісного сенсора плоскопаралельної конструкції для реалізації запропонованого способу дає змогу виокремити рідку фазу бетону (без наповнювача) заданого об'єму. Досягається таке виокремлення завдяки вибраних лінійних розмірів між електродами, які є меншими від розмірів

наповнювача. При цьому об'єм контролюваного бетону формується міжелектродним розміром робочих електродів та розміром отвору захисного електрода, розміщеного між ними.

Для вимірювання електричних параметрів бетону можна використати вимірювач активної та реактивної компоненти адмітансу на фіксованій частоті тестового сигналу. Такими компонентами можуть бути ємність та провідність або активна та реактивна складові адмітансу. За отриманими результатами за необхідності розраховуються діелектрична проникність та питома провідність. Вимірювач повинен забезпечити під'єднання триелектродного сенсора.

Запропонований триелектродний сенсор для контролю зрілості бетону дає змогу контролювати зрілість бетону за висотою бетонної маси. Для цього необхідно орієнтувати отвір захисного електрода в межах його габаритних розмірів та товщини бетону.

Подяка

Автори висловлюють подяку колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Львівська політехніка".

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що щодо цієї роботи немає фінансових чи інших потенційних конфліктів.

Список літератури

- [1] Temperature monitoring, Maturix, 2022. [Online]. Доступно: <https://maturix.com/solution/temperature-monitoring/>
- [2] А. Плугін, С. Мусієнко, С. Микитась, ²Електричний опір залізобетонних шпал та його контроль у виробничих умовах², *Інтелектуальні транспортні технології: IV міжнар. наук.-техн. конф., тези доповідей*, Харків, 27-28 листопада 2023р., УкрДУЗТ, с.333-335.
- [3] Л. Трикоз, І. Багіянци, ²Дослідження електроопору бетону, модифікованого бітумною емульсією², *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті : тези доповідей 6-ї міжнар. наук.- практ. конф.*, Харків, 19-21 квітня 2017р., УкрДУЗТ, с.75-76.
- [4] H. Layssi, P. Ghods, A. Alizadeh, M. Salehi, ²Electrical Resistivity of Concrete², *Concrete International*, vol. 37(5), pp.41-46, 2015. https://www.researchgate.net/publication/282611489_Electrical_Resistivity_of_Concrete
- [5] Evaluating Concrete Quality with Electrical Resistivity Test, Giatec Scientific Inc., 2025. [Online]. Доступно: <https://www.giatecscientific.com/education/evaluating-concrete-quality-with-electrical-resistivity/>
- [6] L. Xiao, X. Wei, ²Determination of Concrete Setting Time Using Electrical Resistivity Measurement², *Journal of Materials in Civil Engineering*, no.19(5), pp.423-427, 2007, doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(423).
- [7] A. Plugin, O. Pluhin, O. Borziak, O. Kaliuzhna, ²The Influence of Storage Conditions on the Electric Conductivity of Concrete², *Materials Science Forum*, 968:50-60, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.50.
- [8] A. Pejman, R. Gupta, ²Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review², *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, doi: 10.1155/2017/8453095.
- [9] K. Obla, R. Hong, ²Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions², *Advances in Materials Science and Engineering*, vol.7(1), 2018, doi:10.1520/ACEM20170126.
- [10] Є. Походило, М. Флінта, ²Адмітансний метод вимірювання електрофізичних параметрів бетону², *Вимірювальна техніка та метрологія*, випуск 86(2), номер 2 с. 38-42, 2025. Доступно: doi:10.23939/istcmtn2025.02.038.

ISSN: 2617-846X (online)

Євген Походило

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9995-3148>

Микола Флінта

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8585-9719>

Дата отримання статті -15.10.25.

Дата отримання фінального варіанту – 29.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.