

АДМІТАНСНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕТОНУ

*Походило Є.В., д.т.н. проф., Флінта М.Є., аспірант,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна;
e-mail: evgenp@meta.ua;
e-mail: mykola.y.flinta@lpnu.ua*

Анотація

В роботі проаналізовані методи контролю якості бетону неелектричними та електричними методами, зокрема за питомим опором. На основі зазначеного виявлено, що реалізація електричного методу, інформативним параметром якого використовується електричний опір, в практичній реалізації є поодиноким. Діелектрична проникність, як інформативний параметр бетону, використовується лише для контролю вологості бетону діелектричними вологомірами. Авторами пропонується одночасне використання питомої провідності та діелектричної проникності, як інформативних параметрів контролю показників якості бетону. При цьому їхнє застосування є можливим протягом тривалого часу ідентифікації бетону, від виробництва до досягання зрілості. Для вимірювання таких параметрів запропоновано адмітансний метод, за яким вимірюють реактивну та активну компоненти адмітансу бетону, що лінійно залежать від діелектричної проникності та питомої провідності. Тобто, інформативними електричними параметрами у даному разі є отримані результати вимірювання зазначених компонент адмітансу. Наведено електричну схему вимірювального засобу для реалізації таких вимірювань та алгоритм ідентифікації бетону різного рівня якості за їхніми результатами.

Ключові слова

Питомий опір, питома провідність, адмітанс, активна компонента, реактивна компонента, бетон, ідентифікація, якість

1. Вступ

Для контролю показників якості бетону використовують переважно неелектричні методи. Щодо застосування електричного методу контролю показників якості бетону, то він передбачає вимірювання електрофізичних параметрів бетону, зокрема питомого опору, або діелектричної проникності. Діелектричну проникність, як інформативний параметр, використовують для вимірювання вологості зрілого бетону діелектричними вологомірами. Існують різні способи вимірювання питомого електричного опору бетону. Найпоширенішими є вимірювання об'ємного та поверхневого питомих опорів, а також вимірювання опору свіжого бетону з використанням вбудованих у бетон електродів. Переважно питомий опір використовують для контролю міцності бетону, а також його можна використати для контролювання процесу його дозрівання. Тобто, зміна питомого опору та діелектричної проникності відображають будь-яку зміну фізико-хімічних властивостей бетону протягом усього його тривалого часу застосування: від виробництва до його зрілості. Зазначені параметри є інформативними і за їхньою зміною можна оцінювати показники якості бетону на будь-якій стадії. Однак, як теоретичні, так і практичні застосування такого методу є поодинокі. Незважаючи на розвиток сучасних методів щодо досліджень бетону, поточна промислова практика все ще використовує традиційні методи випробування міцності на стиск для оцінювання якості бетону. Однак, самі по собі результати випробування на стиск не відображають якість або довговічність бетону. Тим самим розвиток такого методу з його практичним застосуванням є актуальним. Мотивується актуальність також стрімким розвитком будівельної галузі, що призводить до постійного пошуку кращих і ефективніших способів оцінювання якості бетону.

2. Аналіз публікацій

Аналізування літературних джерел за зазначеною темою роботи показав наступне. Для контролю міцності бетону на контрольних зразках переважно використовують традиційні механічні та фізичні неруйнівні методи [1, 2, 3]. Механічні методи базуються на кореляційних зв'язках між міцністю та іншими механічними характеристиками бетону (твердістю, пружністю, здатністю до пластичних деформацій та ін.), а також зусиллям, що викликають його місцеві руйнування. При застосуванні неруйнівних методів міцність визначають за попередньо встановленими градувальними залежностями між міцністю зразків на стиск та непрямими характеристиками міцності [4]. Для фізичних методах застосовуються кореляційні зв'язки міцності бетону з і швидкістю розповсюдження в ньому ультразвукових хвиль та деякими іншими фізичними характеристиками (частотою коливаль, інтенсивністю гама- опромінення при проходженні крізь бетон та ін.). Із фізичних методів на практиці застосовується ультразвуковий метод, який базується на зв'язку між міцністю бетону та швидкістю поширення ультразвукових коливаль [5]. Цей метод застосовують для прискореного визначення міцності бетону на стиск монолітних конструкцій і споруд. Його застосовують також для визначення міцності бетону в процесі тверднення в теплових установках або в природних умовах. Також відомі методи контролю показників

якості бетону за електрофізичними параметрами, а саме: питомим опором чи провідністю [6 -11]. Експериментальні дослідження такого методу показують його перспективність застосування на всіх етапах досягання зрілості бетону. Зокрема, використовують опір як інформативний параметр для контролю параметрів якості залізобетонних шпал у виробничих умовах [9]. В результаті цих досліджень було розроблено Державний стандарт України [12].

Недоліком такого електричного методу є звужена функціональна можливість його застосування, а також засіб реалізації методу не є універсальним. Питомий опір та діелектрична проникність, як основні інформативні електричні параметри бетону, вимірюються технічними засобами різного призначення. Одночасне їхнє вимірювання покращить рівень достовірності контролювання якості бетону та його зрілості, а також ідентифікації фальсифікованого бетону на етапі його виробництва. Реалізуватися такий метод може простими технічними засобами і з можливістю оперативного контролю показників якості бетону як в лабораторних, так і польових умовах.

3. Мета роботи

Метою роботи є розроблення методу контролю якості бетону за параметрами комплексної провідності (адмітансу) за двома параметрами, які пропорційні діелектричній проникності та питомій провідності бетону.

4. Вимірювання електричних параметрів адмітансу бетону та його ідентифікація

4.1 Адмітансний метод вимірювання питомої провідності та діелектричної проникності

Авторами пропонується метод оперативного контролю якості бетону, який полягає у опосередкованому вимірюванні діелектричної проникності та питомої електропровідності бетону. Для цього застосовується вимірювання зазначених параметрів бетону імітансним методом контролю якості [13]. Згідно з імітансним методом бетон подається двополюсником, поміщеним в електричне коло змінного струму з заданими частотою та рівнем тестового сигналу. Так здійснюється перетворення неелектричних параметрів бетону в електричну комплексну величину – адмітанс Y ємнісного характеру. Тобто, реактивна компонента адмітансу буде пропорційна еквівалентній ємності, а активна компонента активній еквівалентній провідності. Саме тому найдоцільніше для ідентифікації такої продукції використати адмітансний метод, як частковий варіант імітансного методу контролю якості [14]. Інформативними параметрами у такому разі будуть реактивна B_x та активна G_x компоненти адмітансу Y_x бетону. Для цього використовують ємнісний первинний перетворювач, у міжелектродний простір якого поміщають об'єкт контролю, що подається багатоелементним двополюсником ємнісного характеру. Спрощена електрична модель такого двополюсника містить паралельну схему еквівалентних ємності C_x та опору R_x . Відповідно, адмітанс такого двополюсника визначається за відомою формулою

$$Y_x = \frac{1}{R_x} + j\omega C_x = G_x + jB_x. \quad (1)$$

Активна та реактивна складові адмітансу (1) описуються виразами

$$G_x = \sigma_x \frac{d}{S} = A_1 \sigma_x \quad (2)$$

$$B_x = \omega C_x = \omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_x S}{d} = A_2 \varepsilon_x \quad (3)$$

де $A_1 = d/S$ стала первинного перетворювача (S та d – площа електродів та відстань між ними); ε_0 – діелектрична проникність вакууму; $A_2 = A_1 \varepsilon_0$, ε_x та σ_x – діелектрична проникність та питома провідність контролюваного бетону, відповідно.

Оскільки електрофізичні параметри σ_x та ε_x лінійно залежать від провідності (2) та ємності (3), то доцільно для вищезазначених вимірювань використати відповідний режим вимірювання приладу, тобто режим роздільного вимірювання параметрів адмітансу за паралельною схемою з реактивною ωC та активною G компонентами. З урахуванням цього зазначені компоненти адмітансу також стають інформативними параметрами. Тобто, отримуємо опосередковане вимірювання питомої провідності σ_x та діелектричної проникності ε_x контролюваного бетону за результатами вимірювання активної та реактивної компонент його адмітансу. Отже, за такими параметрами можна здійснювати ідентифікацію бетону.

4.2 Ідентифікація бетону за електричними параметрами

В основу ідентифікації такої продукції за параметрами адмітансу покладено диференційний метод оцінювання якості продукції [15]. При цьому для ідентифікації бетону різного виду чи різного рівня міцності необхідно порівняти виміряні параметри в аналогічних компонентах його стандартних зразків. Показниками порівняння у даному разі будуть активні та реактивні компоненти адмітансу об'єктів порівняння на частоті ω або на декількох частотах.

Тобто, для здійснення ідентифікації бетону необхідно мати традиційний стандартний зразок, що відповідає за своїми одиничними показниками граничним нормам, за якими бетон ще відноситься до встановленого рівня якості. При цьому показники якості бетону визначені за стандартизованими традиційними методиками. Для того, щоб реалізувати ідентифікацію бетону за параметрами адмітансу необхідно сформувати електричний стандартний (базовий) зразок за результатами вимірювання відповідних активних та реактивних компонент його адмітансу традиційного стандартного зразка бетону на фіксованій частоті (чи фіксованих частотах) [16]. Отже, отримуємо вже базові зразки з відомими реактивними та активними параметрами їхніх адмітансів на фіксованих частоті, що відображають відповідні показники якості бетону.

Аналогічно вимірюються ті ж самі параметри, але вже контрольованого бетону. За диференційним методом оцінювання якості порівнюємо виміряні параметри контрольованого бетону з відповідними параметрами всіх груп базових зразків. Ілюстрація зазначеного для одного базового зразка з електричними параметрами на одній частоті зображена на рис.1.

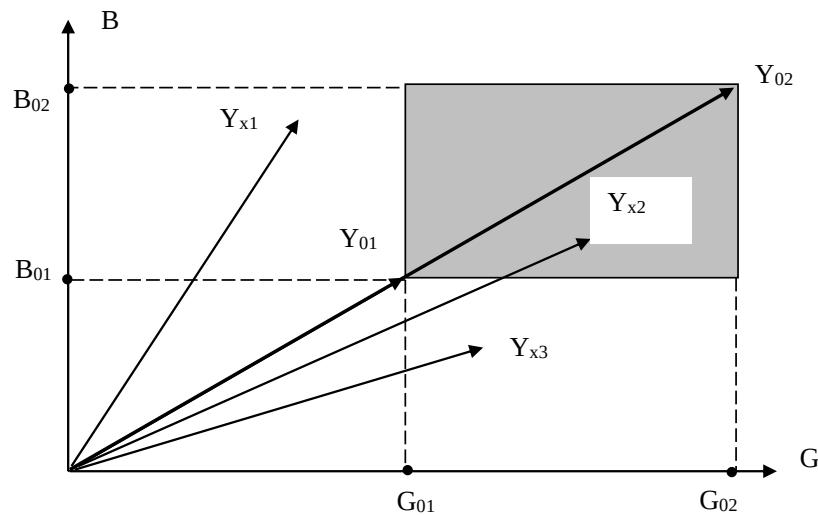


Рис. 1. Обмежений знизу та зверху діапазон змін значень показника якості стандартного зразка

На рисунку межі адмітансу базового зразка зазначені векторами Y_{01} та Y_{02} . Відповідно, матимемо нижні межі активної G_{01} та реактивної B_{01} компонент адмітансу Y_{01} та верхні межі G_{02} та реактивної B_{02} компонент адмітансу Y_{02} . Якщо на вибраній фіксованій частоті виміряні активна та реактивна компоненти адмітансу контрольованого зразка знаходяться у зазначених прямокутником межах, то такий бетон відноситься до нормованого рівня якості, якому відповідають ці межі (бетон з адмітансом Y_{x2}). У разі невідповідності отриманих значень параметрів адмітансу встановленим межам (поза межами), бетон не ототожнюється з прийнятим рівнем, а ідентифікується як такий, що не відповідає нормованому рівню чи фальсифікований у будь-який спосіб (бетони з адмітансами Y_{x1} та Y_{x3}). При цьому необхідно зазначити, що завдяки ідентифікації за двома електричними параметрами можна виявити бетон, який відповідає нормованим значенням лише за одним параметром. Тобто, незважаючи на те, що бетон з адмітансом Y_{x1} відповідає нормованим межам реактивної компоненти (а відповідно і діелектричної проникності), а бетон з адмітансом Y_{x3} - відповідає нормованим межам активної компоненти (а відповідно і питомої провідності), але ідентифікується як такий, що не відповідає нормованим показникам якості.

Практична реалізація такої ідентифікації забезпечується вимірюванням параметрів адмітансу базового зразка та контрольованого бетону одними і тими ж засобами. При цьому вимірювання повинні здійснюватися за однакових кліматичних умов, оскільки температурна залежність інформативних параметрів призводить до їхньої зміни. За відомих температурних залежностей контрольованих параметрів похибку від зовнішніх впливів можна корегувати в процесі вимірювань. Для цього знову ж необхідно мати результати вимірювань зазначених параметрів адмітансу базових зразків бетону за різних температурних умов.

4.3 Реалізація адмітансного методу вимірювання електричних параметрів бетону

Реалізовані вимірювання зазначених параметрів можуть бути простими технічними засобами спеціального призначення або з використанням серійних широкодіапазонних вимірювачів параметрів комплексного опору чи провідності (імітансу). Однак, не завжди вони можуть це забезпечити. Тим більше, що режими їхньої роботи не завжди є прийнятними. Окрім цього не завжди такі вимірювальні засоби є доступними для споживача або вони відсутні у нього. Пропонується структурна схема вимірювального засобу активної та реактивної компонент адмітансу для таких вимірювань (рис.2).

Схема містить джерело тестового сигналу ДТС, що формує синусоїдний сигнал заданого амплітудного значення U_m та частоти, ємнісний первинний перетворювач «об'єкт-імпеданс» з двома неізовльованими плоскими електродами 1, 2, між якими поміщений зразок бетону та векторний перетворювач ВП для перетворення параметрів об'єкта контролю на електричний параметр – адмітанс Y_x з параметрами C_x та R_x . Побудований ВП на операційному підсилювачі ОП, елементами від'ємного зворотного зв'язку якого є зразковий резистор R_0 та об'єкт контролю. Під'єднання об'єкта контролю здійснюється за три електродною схемою, чим усувається вплив неінформативного паралельного до Z_x імпедансу, зумовленого поверхневим імпедансом. Для цього використовується електрод 3, який має спільну точку з ДТС і ВП. Тим самим забезпечується вимірювання параметрів об'ємного імпедансу бетону, оскільки неінформативний імпеданс Z_1 та Z_2 шунтує вихід ДТС (контакт 1) та вхід ОП (контакт 2).

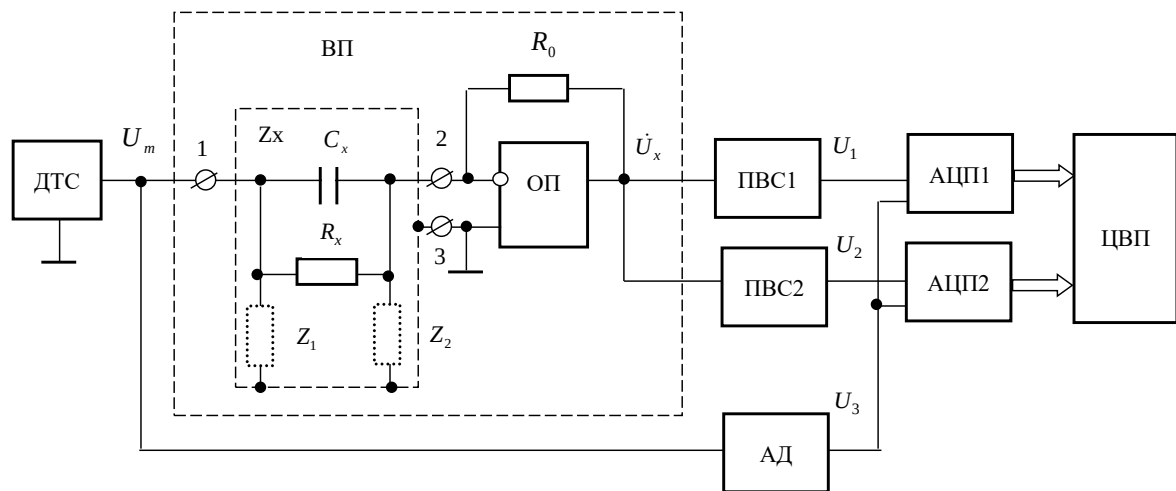


Рис. 2. Структурна схема вимірювача активної та реактивної компонент адмітансу бетону

Вихідна комплексна напруга $\dot{U}_x$ векторного перетворювача з коефіцієнтом перетворення a описується виразом (4)

$$\dot{U}_x = U_m a R_0 (G_x + j\omega C_x), \quad (4)$$

з якої з допомогою перетворювачами «вектор-скаляр» ПВС1 та ПВС2 з коефіцієнтами перетворення b_1 та b_2 формуються напруги

$$U_2 = U_m b_1 R_0 G_x, \quad (5)$$

$$U_1 = U_m b_2 R_0 \omega C_x, \quad (6)$$

які подаються на інформаційні входи аналого-цифрових перетворювачів АЦП1 та АЦП2, відповідно. На опорні входи цих перетворювачів подається сформована амплітудним детектором АД з коефіцієнтом перетворення b_3 напруга

$$U_3 = U_m b_3. \quad (7)$$

У такому разі перетворювачами АЦП1, АЦП2 здійснюється ділення напруг (5) та (6) на напругу (7) і на їхніх виходах отримуємо результати N_1 та N_2 , відповідно

$$N_1 = \frac{U_m b_1 R_0 G_x}{U_m b_3} = \frac{b_1 R_0 G_x}{b_3}. \quad (8)$$

$$N_2 = \frac{U_m b_2 R_0 \omega C_x}{U_m b_3} = \frac{b_2 R_0 B_x}{b_3}, \quad (9)$$

Нескладний аналіз виразів (8) та (9) показує, що результат вимірювання не залежить від напруги ДТС і лінійно залежить від реактивної та активної компоненти адмітансу бетону, а з урахуванням виразів (2) та (3) отримаємо

$$N_1 = \frac{b_1 R_0}{b_3} A_1 \sigma_x, \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{b_2 R_0}{b_3} A_2 \varepsilon_x \cdot \quad (11)$$

Значення діелектричної проникності та питомої провідності у разі необхідності отримуємо через перетворення виразів (10) та (11). Тоді матимемо

$$\sigma_x = \frac{A_1 N_1 b_3}{b_1 R_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon_x = \frac{A_2 N_2 b_3}{b_2 R_0} \quad (13)$$

Отже, запропонований адмітансний метод вимірювання електрофізичних параметрів бетону дає змогу реалізувати диференційний метод оцінювання якості продукції та її ідентифікацію за реактивною та активною компонентами його адмітансу. Також за отриманими результатами вимірювань зазначених параметрів можна здійснювати теж саме за електрофізичними параметрами.

5. Висновки

1. Адмітансний метод вимірювання активної та реактивної компонент адмітансу бетону дає змогу ідентифікувати його за двома параметрами одночасно, а саме: за питомою активною провідністю та діелектричною проникністю. При цьому метод дає змогу контролювати активну та реактивну компоненти адмітансу бетону різного рівня якості в широкому частотному діапазоні та аналізувати їхні амплітудно-частотні характеристики.
2. Запропонований метод контролю якості бетону забезпечує оперативність контролю та може бути реалізований вимірювальними засобами як лабораторного, так і польового застосування. Ідентифікація бетону за двома електрофізичними параметрами забезпечує вищий рівень достовірності контролю якості у порівнянні з використанням лише одного параметра.
3. Запропоновано алгоритм формування електричного зразка бетону за результатами вимірювання параметрів адмітансу традиційних стандартних зразків бетону, що відповідають заданим нормативним вимогам щодо рівня якості.
4. На відміну від традиційних випробувань на міцність, запропонований метод є неруйнівним, що робить його ідеальним для збереження структурної цілісності бетону під час оцінювання його якості. Завдяки таким перевагам, як простота використання, оперативність отримання результатів та кореляція з властивостями бетону, мотивуються дослідження для стандартизації з метою формування вимог щодо питомої електричної провідності (опору) та діелектричної проникності на всіх етапах використання бетону.

Конфлікт інтересів

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

Список використаної літератури

1. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.7-214:2019
2. ASTM C39/C39M-17b. Стандартний метод випробування міцності на стиск циліндричних бетонних зразків. ASTM International; West Conshohocken, PA: 2017. www.astm.org. [[Google Scholar](#)]
3. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.7-223:2009
4. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.7-220:2009
5. Державний стандарт України ДСТУ Б В.2.7-226:2009
6. Плугін А. А. Електричний опір залізобетонних шпал та його контроль у виробничих умовах / А. А. Плугін, С. М. Мусієнко, С. В. Микитась // Інтелектуальні транспортні технології : IV міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. - Харків : УкрДУЗТ, 2023. - С. 333-335.Л.В.
7. Трикоз, І.В. Багіянец. Дослідження електроопору бетону, модифікованого бітумною емульсією.
8. NAMED Layssi, Pouria Ghods, Aali R. Alizadeh, and Mustafa Salehi Electrical Resistivity of Concrete. Concrete International, 37(5) (2015) 41-46.
9. Плугін А.А., Бабій А.І., Плугін О.А., Борзяк О.С., Калюжна О.В. Вплив умов зберігання на електропровідність бетону. VI Міжнар. конфер. «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса (2019) 320–324.
10. Li Z, Xiao L, Wei X. Визначення часу схоплювання бетону за допомогою вимірювання питомого електричного опору. J Mater Civ Eng. 2007;19(5):423–427. [[Google Scholar](#)]
11. Obla K, Hong RJ, Lobo CL. Оцінка стандартної практики ASTM щодо вимірювання електричного опору свіжого бетону. Звіт про дослідження NRMCA. 15 вересня 2017 р.; Доступно за адресою:

http://web.archive.org/web/20170925175233/https://www.nrmca.org/research_engineering/Documents/FreshResistanceWCMReportSep17.pdf .

12. Державний стандарт України СТУ Б В.2.6-209:2016.
13. <https://www.youtube.com/watch?v=B0tySpbBJoA>
14. Походило Є.В. Імітансний контроль якості: монографія / Є.В. Походило, П.Г. Столярчук. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2012. – 164 с.
15. ДСТУ 2925-94 Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення
16. Pokhodylo Y., Yatsuk V., Bubela T. Means of measurement of relative quality indicators by immittance parameters . Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 81, № 3. – С. 33–36.