

Висновки.

В результаті дослідження були одержані такі результати:

- при роботі ДВЗ без навантаження якісну роботу регулятора забезпечують П-, ПП-, ППД-регулятори. Перехідний процес з мінімальною тривалістю забезпечує пропорційний регулятор, а ППД-регулятор забезпечує відсутність статичної помилки;

- при роботі ДВЗ з навантаженням найкращі показники якості перехідного процесу забезпечив пропорційно-інтегральний регулятор.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания / Дьяченко В.Г. / Учебник. – Текст]. – Харьков: ХНАДУ, 2009. — 500 с.
2. Крутов В. И. Автоматическое регулирование и

управление двигателей внутреннего сгорания. - [Текст]. – М.: Машиностроение, 1989.- 461 с.

3. Олссон, Г. Цифрові системи автоматизації і управління / Г. Олссон, Д. Пиани. – [Текст]. – СПб.: Невський Діалект, 2001. – 557 с.

4. Филипп, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипп, Р. Харбор. – [Текст]. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 616 с.

5. Дорф, Р. Сучасні системи управління / Р. Дорф, Р. Бішоп. – [Текст]. – М.: Лабораторія Базових Знань, 2002 – 832 с.

6. Гурко О.Г. Аналіз і синтез систем автоматичного керування в MATLAB: Навчальний посібник / Гурко О.Г., Єрьоменко І.Ф. – [Текст]. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 300 с.

7. Гурко А.Г. Теория автоматического управления: Учебно-методическое пособие / Гурко А.Г., Еременко И.Ф., Кортнева В.С., Байдакова А.В., Биньковская А.Б. – [Текст]. – Харьков, ХНАДУ, 2009. – 216 с.

УДК 535.075.8

ДИСТАНЦІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ БЕТОННОЇ ПЛИТИ МОСТОВОЇ СПОРУДИ

Д.т.н. О. В. Полярус, А. В. Лебединський, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

У статті запропоновано спосіб дистанційного визначення діелектричної проникності бетонних мостових споруд за допомогою радіотехнічних засобів. Для досягнення необхідної точності її оцінки обґрунтовані вимоги щодо похибок вимірювання амплітуди напруженості поля в приймачі та нестабільності частоти передавача.

В статье предложен способ определения диэлектрической проницаемости бетонных мостовых сооружений с помощью радиотехнических средств. Для достижения необходимой точности её оценки обоснованы требования к погрешностям измерения амплитуды напряженности поля в приёмнике и нестабильности частоты передатчика.

The method of determining the permittivity of concrete bridge structures using radio equipment is proposed in the article. To achieve the necessary accuracy of its estimation, the requirements to the errors in measuring the amplitude of the field strength in the receiver and the instability of the frequency of the transmitter are established.

Ключові слова: діелектрична проникність, мостові споруди, радіотехнічні системи, напруженість електричного поля.

Вступ

Існуючі методи контролю стану мостових споруд (МС) в Україні припускають локальне руйнування ділянок залізобетонної конструкції з метою оцінки стану арматури, що витримує динамічні навантаження на мості. Це вимагає значних часових витрат з логічними наслідками подорожчання процесу експлуатації. Створення нових підходів на основі новітніх вимірювальних інформаційних технологій для ранньої

діагностики та прогнозування стану МС дозволяє підвищити надійність завчасного виявлення та попередження руйнування вузлів та елементів мостових конструкцій, тим самим, попередити виникнення надзвичайних ситуацій на дорозі, скоротити витрати при незапланованому ремонті чи глобальній реконструкції. Світова практика ранньої діагностики стану ґрунтується на використанні апаратно-програмних комплексів неруйнівної діагностики, що дозволяє експертам за короткої проміжок часу провести комплексну оцінку стану елементів та вузлів конструкції. Такі засоби діагностики базуються на різних фізичних принципах, наприклад корпорація «Polytec» є виробником високоточних лазерних віброметрів, які забезпечують високу точність, надійність та швидкість обробки отриманих даних за рахунок використання спеціального апаратно-програмного комплексу. Головним недоліком зазначеного засобу є його висока вартість, що в рамках фінансування галузі дорожнього будівництва та ремонту в Україні є не прийнятним. Експериментальні дослідження дозволяють виявити високо корельовані параметричні зв'язки та обрати засоби їх діагностування. Отже, методи дистанційного вимірювання динамічних характеристик МС до цього часу не розроблені в Україні і тільки в останні роки почали розвиватись в деяких розвинутих країнах світу (США, Італія, Китай, Японія тощо). Вони поки що є непривабливими для України з економічної точки зору. Потрібні більш дешеві технології, якість яких буде сумірною з іноземними технологіями. Для розробки подібних технологій не вистачає методів побудови відносно дешевих високоточних неконтактних вимірювальних інформаційних систем, що поєднуються з системами діагностики МС.

Аналіз публікацій

Роботи іноземних науковців розвиваються в декількох напрямках. По-перше, в напрямку використання радарних малогабаритних систем міліметрового та оптичного діапазонів електромагнітних хвиль (наприклад, в США, Італії, [1-6]) для оцінки деформацій та прогинів елементів МС, в тому числі силових тросів (stay-cables), що підтримують споруди. Для цього використовуються, зокрема, фазові інтерферометри з великою розрізнявальною здатністю по дальності. Зазначені системи вимірюють динамічні характеристики мостових споруд в локальних точках. По-друге, в напрямку застосування опто-механічних систем технічного зору (наприклад, в Польщі, Японії, [7-9]) з наступною обробкою зображень за розробленими алгоритмами, що дозволяє здійснювати аналіз динаміки конструкцій МС в розподілених областях. Ці методи не визначають важливий для практики коефіцієнт динамічності споруд. По-третє, в напрямку застосування алгоритмів обробки GPS-даних з фільтрацією Калмана для отримання оцінок коефіцієнту динамічності МС (наприклад, в Китаї [10]). Низка статей присвячена дистанційним методам вимірювання прогинів нижньої частини (плити) мостової споруди. Зокрема, в [11], [12] приведено метод оцінки коефіцієнта динамічності споруд, що ґрунтується на вимірюванні фази сигналу, відбитого від бетонної плити споруди. Подальший розвиток цього методу, спрямованого на вимірювання динамічних прогинів залізобетонних конструкцій шляхом аналізу електромагнітного поля в дальній зоні штучно створеної решітки пасивних випромінювачів на нижній частині мосту приведений в [13]. В [14] обґрунтований метод визначення прогинів в ближній зоні зазначеної решітки. Авторами отримано патент на винахід [15] по визначенню коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів. В цих та інших роботах припускається, що відбиття електромагнітних хвиль (ЕМХ) відбувається головним чином від металевих пасивних випромінювачів, хоча розсіювання ЕМХ від залізобетону може бути значним, а це впливає на точність вимірювання прогинів мосту. Для моделювання відбитих сигналів від плити МС необхідно мати інформацію про діелектричну проникність бетону на вибраний час проведення вимірювань. Вона для багатьох мостових споруд, а також технічних і будівельних об'єктів змінюється в залежності від різних зовнішніх і внутрішніх факторів. Наприклад, діелектрична проникність нижньої частини поверхні мостових споруд під дією дощу, вологості чи сонячного світла може змінюватись від 2 до 10 в залежності від технології виготовлення та умов експлуатації бетону, а вона містить важливу діагностичну інформацію. Існують чисельні методи вимірювання діелектричної проникності, огляд яких зроблено в [16], однак для випадку, що розглядається, доцільно проводити її дистанційне вимірювання з використанням радіотехнічної апаратури для визначення прогинів.

Метою статті є розробка методу дистанційного вимірювання діелектричної проникності бетонної плити мостової споруди або іншого великогабаритного об'єкту

за допомогою малогабаритного радара. Для цього необхідно отримати аналітичні залежності амплітуди відбитих від плити ЕМХ від факторів, що впливають на діелектричну проникність бетону та потім оцінити точність оцінки діелектричної проникності.

Основні математичні співвідношення

Метод припускає використання двох приймальних елементів на деякій відстані від випромінюючого елемента, який закріплюється на нижній поверхні мостової споруди (рис. 1).

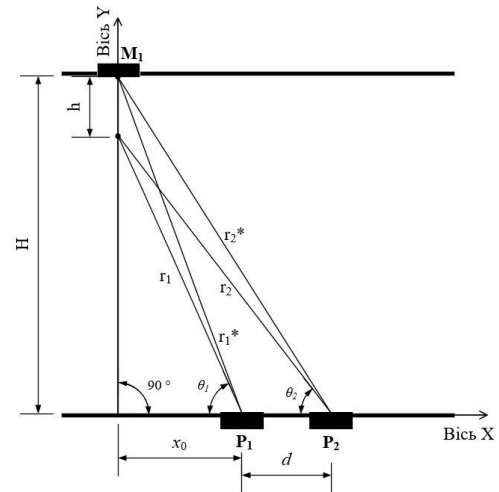


Рис. 1. Пояснення геометрії задачі

Випромінювання є вторинним і обумовлено дією первинної ЕМХ, що попадає на плиту нижньої частини мостової споруди. Випромінювач підвішується на відстані h від бетонної плити. В першому приймальному елементі створюється комплексна амплітуда напруженості поля \dot{E}_1 , а в другому – \dot{E}_2 , які описуються формулами:

$$\dot{E}_1 = \frac{A}{r_1^*} e^{-jkr_1^*} + \frac{A}{r_1} R_{\varepsilon 21}(\varepsilon) e^{-jkr_1}, \quad (1)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{A}{r_2^*} e^{-jkr_2^*} + \frac{A}{r_2} R_{\varepsilon 22}(\varepsilon) e^{-jkr_2}, \quad (2)$$

де A – амплітуда поля, що випромінюється вторинним випромінювачем;

r_1^* – відстань між випромінювачем та першим приймальним елементом;

r_2^* – відстань між випромінювачем та другим приймальним елементом;

r_1 – відстань між дзеркальним випромінювачем та першим приймальним елементом;

r_2 – відстань між дзеркальним випромінювачем та другим приймальним елементом;

$R_{\varepsilon 21}(\varepsilon)$ – комплексний коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль вертикальної (θ) або горизонтальної (ϱ) поляризації від бетонної плити мостової споруди, що має діелектричну проникність ε (для напрямку на перший приймальний елемент);

$R_{\varepsilon 22}(\varepsilon)$ – такий же коефіцієнт, але для напрямку на другий приймальний елемент.

Напишемо вирази (1) і (2) у вигляді:

$$\dot{E}_1 = \alpha_1 + R_{\epsilon z1}(\epsilon)\beta_1, \quad (3)$$

$$\dot{E}_2 = \alpha_2 + R_{\epsilon z2}(\epsilon)\beta_2, \quad (4)$$

Де

$$\alpha_1 = \frac{A}{r_1^*} e^{-jk r_1^*}, \alpha_2 = \frac{A}{r_2^*} e^{-jk r_2^*},$$

$$\beta_1 = \frac{A}{r_1} e^{-jk r_1}, \beta_2 = \frac{A}{r_2} R_{\epsilon z2}(\epsilon) e^{-jk r_2}. \quad (5)$$

Розділимо (3) на (4), при умові, що останнє не дорівнює нулю, і отримаємо

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{\alpha_1 + R_{\epsilon z1}(\epsilon)\beta_1}{\alpha_2 + R_{\epsilon z2}(\epsilon)\beta_2}. \quad (6)$$

Звідси маємо

$$\dot{\alpha}_2 \dot{E}_1 - \dot{\alpha}_1 \dot{E}_2 = \dot{\beta}_1 \dot{E}_2 \dot{R}_{\epsilon z1}(\epsilon) - \dot{\beta}_2 \dot{E}_1 \dot{R}_{\epsilon z2}(\epsilon)$$

або

$$\dot{\delta} = \dot{\gamma}_1 \dot{R}_{\epsilon z1}(\epsilon) - \dot{\gamma}_2 \dot{R}_{\epsilon z2}(\epsilon), \quad (7)$$

де

$$\dot{\delta} = \dot{\alpha}_2 \dot{E}_1 - \dot{\alpha}_1 \dot{E}_2, \dot{\gamma}_1 = \dot{\beta}_1 \dot{E}_2, \dot{\gamma}_2 = \dot{\beta}_2 \dot{E}_1. \quad (8)$$

Підставляємо в (7) вираз для коефіцієнтів відбиття для горизонтальної поляризації ЕМХ

$$\dot{\delta} = \dot{\gamma}_1 \frac{\sin \theta_1 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}}{\sin \theta_1 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}} - \dot{\gamma}_2 \frac{\sin \theta_2 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}{\sin \theta_2 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}. \quad (9)$$

Нелінійне рівняння (9) містить одне невідоме значення – діелектричну проникність бетону ϵ .

Аналогічно розв'язується задача для вертикальної поляризації ЕМХ. Діелектрична проникність ϵ для відповідної поляризації ЕМХ знаходиться з нелінійних рівнянь (9, 10)

$$\dot{\delta} = \dot{\gamma}_1 \frac{\epsilon \cdot \sin \theta_1 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}}{\epsilon \cdot \sin \theta_1 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_1}} - \dot{\gamma}_2 \frac{\epsilon \cdot \sin \theta_2 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}{\epsilon \cdot \sin \theta_2 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta_2}}. \quad (10)$$

Точність методу визначення діелектричної проникності

Для перевірки роботи даного методу було проведено моделювання діелектричної проникності в математичному пакеті «MatLab» для відомих значень амплітуд напруженості полів E_1 та E_2 в двох приймальних антенах та відстанях і кутах, що характеризують геометрію задачі (рис. 1): $r_1 = 36.1$ м., $r_2 = 28.3$ м., $r_1^* = 36.6$ м., $r_2^* = 29$ м., $\theta_1 = 46^\circ$, $\theta_2 = 36^\circ$.

На рис. 2 та 3 приведені приклади залежностей похибок визначення діелектричної проникності від похибок вимірювання амплітуд напруженості електричного поля в двох приймальних елементах для

горизонтальної та вертикальної поляризації ЕМХ. Щоб похибки вимірювання діелектричної проникності не перевищували 10%, похибки вимірювання амплітуди напруженості поля не повинні виходити за межі 4%. При підвищенні рівня зовнішніх завад вимоги щодо точності вимірювання амплітуди поля зростають і тому перед проведенням вимірювань треба впевнитись в низькому рівні завад.

Як видно з формул (3)–(6), діелектрична проникність залежить від довжини хвилі або частоти. Залежності похибки вимірювання ϵ від нестабільності відносної частоти передавача $\Delta f/f$ для горизонтальної та вертикальної поляризації приведені на рис. 4.

Отже, нестабільність частоти передавача, який генерує ЕМХ, не повинна перевищувати приблизно 10^{-6} , що виконується на практиці.

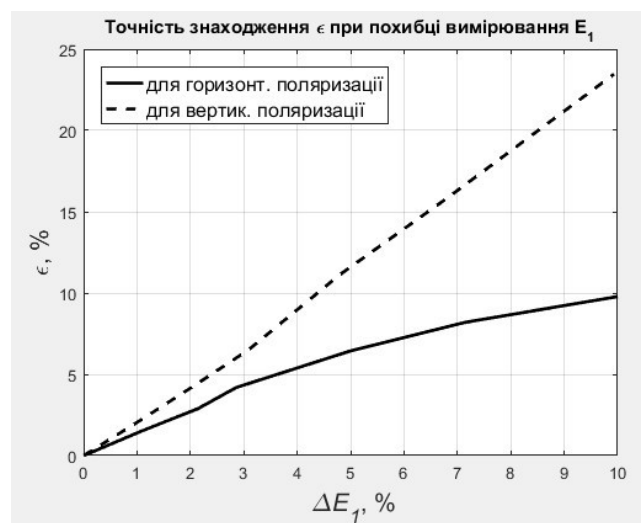


Рис. 2. Вплив похибок вимірювання амплітуди напруженості поля E_1 на похибки визначення діелектричної проникності ϵ

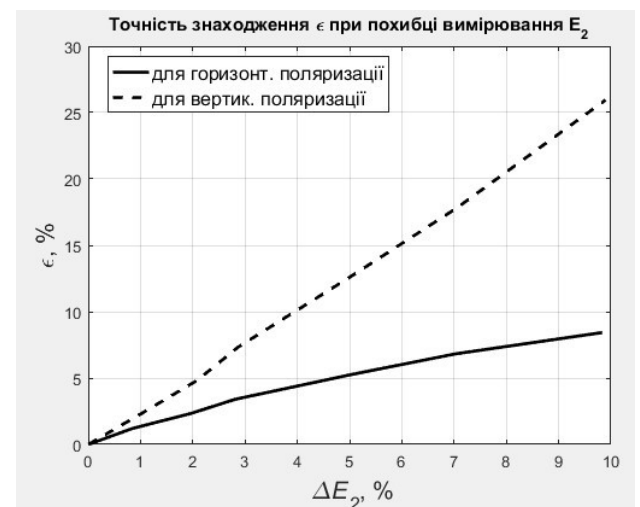


Рис. 3. Вплив похибок вимірювання амплітуди напруженості поля E_2 на похибки визначення діелектричної проникності ϵ

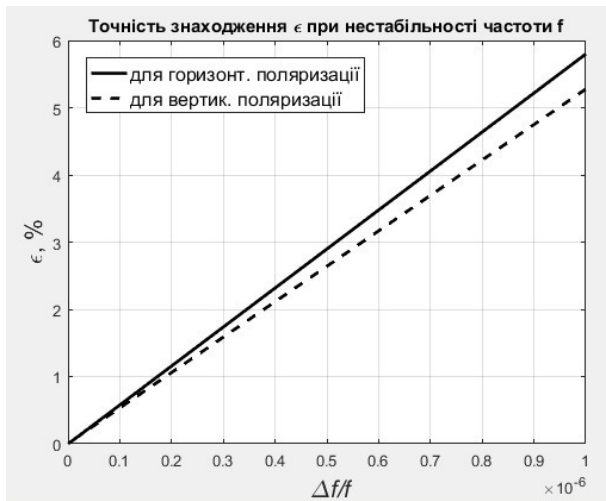


Рис. 4. Залежність похибок визначення діелектричної проникності ϵ від нестабільності відносної частоти передавача $\Delta f/f$

Описаний метод дозволяє оцінити діелектричну проникність бетону з урахуванням арматури всередині нього, оскільки поле формується відбиттям від всієї плити мостової споруди.

Висновки

Представлений підхід може використовуватись для дистанційного визначення поточного значення діелектричної проникності бетонних мостових конструкцій або інших великогабаритних об'єктів з похибками, які є допустимими для практичного використання. Дистанційні вимірювання значно скорочують часові витрати на проведення експериментів і попереднього математичного моделювання прогинів мостової споруди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Carmelo Gentile. *Application of Microwave Remote Sensing to Dynamic Testing of Stay-Cables*. - *Remote Sensing*, 2010, vol. 2, pp. 36-51.
2. Patrick Paultre, Omar Chaallal, Jean Proulx. *Bridge dynamics and dynamic amplification factors – a review of analytical and experimental findings*. - *Can. J. Civ. Eng.*, 1992, №19, pp. 260-278.
3. Cheol-Hwan Kim, Byung-Wan and Jin-Taek. *Application of Laser Vibrometer to the Measurement and Control of Cable Tensile Forces in Cable-Stayed Bridges*. - *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, vol. ID 810682, 7 pages.

4. Charles R. Farrar, Timothy W. Darling, Albert Migliori and William E. Baker. *Microwave Interferometers for non-contact vibration measurements on large structures*. - Los Alamos National Laboratory, 2000. – 14 p.

5. Larry D. Olson, P. E. Olson. *Recent advances in NDE and SHM of bridge superstructure with sonic and radar methods*. – FHWA 2010, *Nondestructive Evaluations of Bridges*, 2010, pp. 1-12.

6. Mayer, L., Yanev, B., Olson, L.D. and Smyth, A.W. *Monitoring of the Manhattan Bridge for Vertical and Torsional Performance with GPS and Interferometric Radar Systems*”, *Proceedings CD, Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 2010.

7. Piotr Olaszek. *Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method*. - *Measurement*, 1999, vol. 25, pp. 227–236.

8. Shien Ri, Tatsuro Numayama, Masumi Saka, Kenichi Nanbara and Daisuke Kobayashi. *Noncontact Deflection Distribution Measurement for Large-Scale Structures by Advanced Image Processing Technique* - *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 2, 2012, pp. 323...329.

9. *Displacement Measurement of Burr Arch-Truss Under Dynamic Loading Based on Image Processing Technology*. - 6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology August 1-2, 2015, University of Illinois, Urbana-Champaign, United States.

10. R. Kaloop Mosbeh, Li Hui. *Analysis of bridge movements and damage based on GPS monitoring technique*. - *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2010, вып. 1, т. 1, с.1-5.

11. Полярус О. В., Барчан В. В. *Радіотехнічна система оцінки коефіцієнта динамічності мостової конструкції*. - *Харьков: Прикладная радиоэлектроника*, 2011, том 10, №3, с. 368...371.

12. Полярус О. В., Барчан В. В. *Визначення граничного значення коефіцієнта динамічності мостової споруди як показника, що визначає вимоги її безпечної експлуатації*. - *Харьков: Вестник ХНАДУ*, 2012, вып. 59, с. 219...222.

13. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Brovko Ya. S. *Measurement method of the object surface deflections using antennas theory*. - 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, pp. 416-418.

14. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lebedynskii A. V., Ivanov V. K., Pashchenko R. E. *Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System*. - *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. (USA) - Volume 2, Issue 6, Page No 217-224, 2017.

15. Полярус О. В., Поляков Є. О., Лебединський А. В., Кириченко І. В. *Спосіб дистанційного визначення коефіцієнта динамічності і форми деформованої поверхні мостових споруд або інших великогабаритних об'єктів*. - Патент на винахід №118730; номер заявки a201710596; 25.02.2019; Бюлетень № 4/2019.

16. Роман Івах, Богдан Стадник, Тарас Домінюк. *Дієлькометрія: стан та перспективи розвитку*. – *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2014, №75, с. 24-26.