

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ІМПУЛЬСНОМУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАЧІ ДЛЯ ЗБУДЖЕННЯ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ У БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

К.А. Городжа<sup>1\*</sup>, канд.техн.наук, О.Д. Подольцев<sup>2\*\*</sup>, докт.техн.наук, Б.А. Трощинський<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> - Київський національний університет будівництва та архітектури,

пр. Повітрофлотський, 31, Київ, 03037, Україна. E-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohdat@gmail.com](mailto:bohdat@gmail.com).

<sup>2</sup> - Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua).

*Проведено чисельний кінцево-елементний аналіз електромагнітних процесів в імпульсному електродинамічному випромінювачі для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях для двох варіантів його конструктивного виконання – без шихтованого магнітопроводу та з магнітопроводом, в пазу якого розташований багатовитковий індуктор. При цьому розглядається коло-польова модель, що враховує залежність розрядного струму ємнісного накопичувача від характеру дифузії магнітного поля в об'ємі струмопровідної пластини. Показано, що електромагнітна сила, яка діє на цю пластину протягом першої напівхвилі розрядного струму, змінюється у часі як функція, близька до дзвіноподібної, що важливо для здійснення діагностики бетонних конструкцій. Наявність магнітопроводу при одних і тих самих параметрах розрядного кола, розмірах індуктора і пластини призводить до збільшення тривалості та амплітуди силового імпульсу приблизно на 30%. Також у разі використання магнітопроводу відбувається перерозподіл електромагнітних сил так, що провідники індуктора розвантажуються від їхньої дії, а магнітопрвід відчуває значне силове навантаження.*  
Бібл. 8 рис. 5.

**Ключові слова:** імпульсний електродинамічний випромінювач, розрядний струм, електромагнітна сила, хвильові механічні процеси, діагностика, бетонні конструкції.

**Вступ.** У дефектоскопії лінійно-протяжних бетонних конструкцій, доступних лише з боку одного торця буронабивних паль і стовпів, застосовується ехо-метод з ударним збудженням пружних хвиль. Для проведення експериментальних досліджень із використанням такого методу потрібний випромінювач, здатний збуджувати в об'ємі нормовані за амплітудою потужні механічні імпульси, параметри яких у процесі випробувань можуть змінюватися в межах 1.0–10 кН з амплітудою і 0,1–2.0 мс за тривалістю, та створювати в обстежуваній конструкції пружну хвилю за формою, близькою до дзвіноподібної, яка у разі поширення в пружно-в'язкому середовищі зазнає незначних спотворень [1]. Близьку форму імпульсу у вигляді затухаючої "квадратичної синусоїди" здатні генерувати імпульсні електродинамічні випромінювачі (ІЕВ), засновані на взаємному відштовхуванні протилежно протікаючих струмів при коливальному, а також граничному випадку аперіодичного розряду конденсатора [2]. Конструкція ІЕВ може бути виконана без застосування і з застосуванням феромагнітного магнітопроводу в індукторі. Останні, зазначені в літературі як індукційно-динамічні двигуни (перетворювачі), збуджують ударні імпульси тривалістю більше однієї мілісекунди з повторними циклами роботи [3, 4]. Випромінювачі без магнітопроводу характеризуються більш високою швидкістю і значною імпульсною механічною потужністю, але мають відносно низький ККД (8–10)% і застосовуються під час магнітно-імпульсної обробки тонких пластин і оболонок [5], у приводах комутаційних апаратів [6] та в наукових дослідженнях [7]. Розрахунок електромагнітних процесів у таких випромінювачах виконується, як правило, на основі побудови еквівалентних схем заміщення, параметри яких залежать від характеру проникнення магнітного поля в провідну пластину або оболонку, а ці процеси, в свою чергу, залежать від часових характеристик розрядного струму [8]. Більш точні моделі таких випромінювачів можуть бути побудовані на основі спільного застосування теорії електромагнітного поля і теорії електричних кіл – коло-польової моделі.

*Метою цієї роботи є розрахунок методом кінцевих елементів імпульсного електромагнітного поля і перехідних електромагнітних процесів в імпульсному електродинамічному випромінювачі з*

урахуванням процесів у розрядному контурі та його силових характеристик, що визначають хвильові процеси в об'ємі бетонних конструкцій, які діагностуються із застосуванням таких випромінювачів.

Для досягнення мети використовується коло-польова модель, що дає змогу отримувати в ході визначення залежності від часу розрядного струму та інтегральної електромагнітної сили, які залежать також від характеру розподілу імпульсного магнітного поля і щільності струму по перетину провідної пластини. Розглядаються два варіанти конструктивного виконання електродинамічного випромінювача – без шихтованого магнітопроводу та з магнітопроводом, у пазу якого розташовано індуктор.

**Постановка задачі.** Конструктивно розглянутий ІЕВ (рис. 1) складається з плоского багато-виткового індуктора 1, струмопровідної пластини 2, яка закріплена на торці досліджуваної бетонної конструкції та здійснює передачу силового імпульсу. У загальному випадку такий випромінювач може містити шихтований магнітопровід 3.

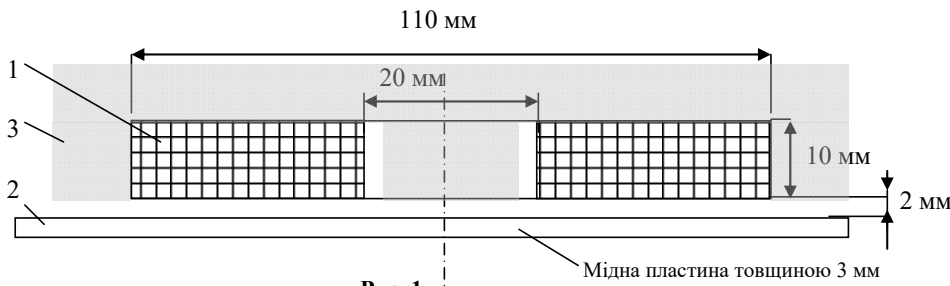


Рис. 1

Математична модель, яка описує імпульсний електромагнітний процес у такому випромінювачі, записується відносно невідомих векторного магнітного потенціалу,

що має єдину тангенціальну складову  $\mathbf{A} = (0, 0, A_\varphi)$ , та розрядного струму (або електричного заряду). Задача розглядається у вісесиметричному наближенні та за умови нерухомої протягом дії силового імпульсу пластини.

Диференціальні рівняння для векторного магнітного потенціалу мають такий вигляд:

$$1) \text{ у повітрі: } \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0; \quad (1)$$

$$2) \text{ в області магнітопроводу: } \nabla \times ((\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0; \quad (2)$$

$$3) \text{ в області індуктора: } \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0; \quad (3)$$

$$4) \text{ в області електропровідної пластини } \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0, \quad (4)$$

де  $\mu_r$  – відносне значення магнітної проникності магнітопроводу,  $\sigma$  – електропровідність пластини,  $\mathbf{J}_0 = (0, 0, J_{0\varphi}) = iw/S$  – густина струму в індукторі, що має єдину  $\varphi$ -складову і визначається в ході вирішення цього завдання,  $w$  – число витків в індукторі,  $S$  – площа його поперечного перерізу.

Баланс напруг для розрядного електричного кола має вигляд

$$u_C + iR + \frac{d\Psi}{dt} = 0 \quad (5)$$

або, що еквівалентно, для величини заряду  $q$

$$\frac{q}{C} + \frac{dq}{dt} R + \frac{d\Psi}{dt} = 0, \quad (6)$$

де  $C$  – ємність попередньо зарядженої до напруги  $U_0$  конденсаторної батареї,  $R$  – сумарний активний опір на змінному струмі лінії підведення та індуктора, який розраховується із врахуванням частоти струму. Його значення може бути скориговано після визначення розрядної характеристики випромінювача.

Початкові умови:

$$A|_{t=0} = 0, \quad q|_{t=0} = U_0 / C, \quad dq / dt|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Граничні умови:

на осі  $r = 0$  задається умова симетрії, а на всіх зовнішніх кордонах – умова магнітної ізоляції.

Поставлена задача розв'язується чисельним методом кінцевих елементів із застосуванням пакета програм COMSOL Multiphysics. Розрахунки виконувалися за наступних значень параметрів:  $C = 750$  мкФ,  $U_0 = 500$  В,  $R = 0,03$  Ом,  $w = 40$ , матеріал пластини – мідь, геометричні розміри індуктора та пластини показані на рис. 1.

**Результати розрахунків електродинамічного випромінювача без магнітопроводу.** Інтегральні характеристики розрядного процесу – електричний струм у колі індуктора і напруга на конденсаторі – показані на рис. 2 (суцільні криві), а інтегральна електромагнітна сила  $F_{em}$ , що діє на пластину в осьовому напрямку, – на рис. 3 (суцільні криві).

З рис. 2 видно, що за обраних параметрів індуктора та розрядного кола процес розряду має коливальний характер, причому тривалість силового імпульсу  $\tau$ , що визначається як проміжок часу від початку процесу і до точки першого переходу через нуль кривої струму (сили), дорівнює 0,56 мс (рис. 2 і 3). За результатами розрахунку можна оцінити масу вантажу  $m$ , яку необхідно додатково закріпити на індукторі для забезпечення відносно малого його переміщення протягом тривалості імпульсу  $\tau$ . Прийmemo, що це переміщення досягає значення  $0,1\delta$ , де  $\delta = 2$  мм – величина повітряного зазору в початковий момент часу. Використовуючи наступні рівності  $ma = F_{em,cp}$  і  $0,1\delta = a\tau^2 / 2$ , одержимо  $m = 0,5F_{em,cp}\tau^2 / (0,1\delta) = 4$  кг (тут приймалося  $F_{em,cp} = 5000$  Н).

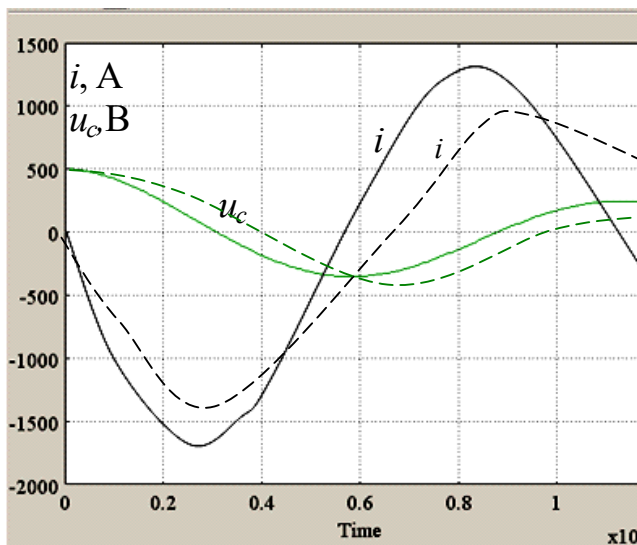


Рис. 2

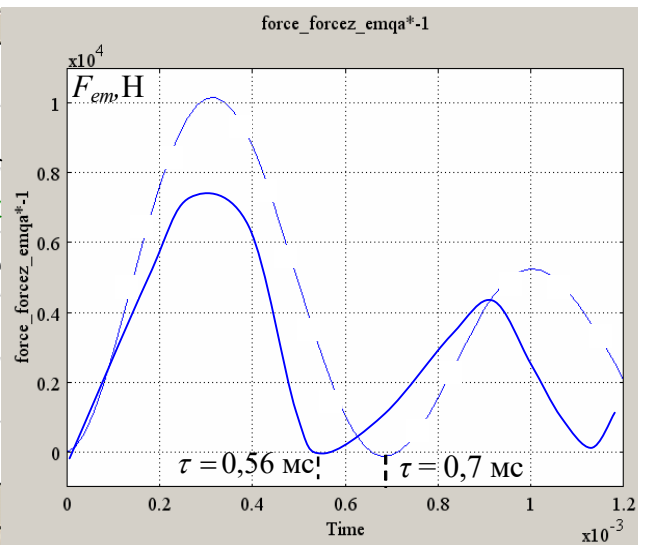


Рис. 3

Розподіл об'ємної щільності електромагнітної сили в поперечному перерізі індуктора і пластини, а також силові лінії магнітного поля в різні моменти часу показані на рис. 4. Видно, що поле через відносно велику товщину пластини протягом тривалості імпульсу практично не проникає через пластину. Також у кінці процесу на внутрішній стороні пластини з'являються розподілені в перерізі пластини електромагнітні сили, що спрямовані до індуктора. Тобто, якщо на основній ділянці розрядного струму пластини відштовхується від індуктора, то в кінці розрядного процесу виникають сили, що притягають пластину до індуктора (хоча інтегральна сила в цей момент і для цього режиму приблизно дорівнює нулю – див. рис. 3).

**Результати розрахунків електродинамічного випромінювача з шихтованим магнітопроводом.** Розрахунки виконувалися за тих самих розмірів індуктора, пластини і параметрів ємнісного накопичувача та розрядного кола. Результати розрахунку інтегральних характеристик показані на

рис. 2, 3 пунктирними кривими. Порівняння цих характеристик з аналогічними для електродинамічного випромінювача без магнітопроводу показує, що наявність магнітопроводу призводить до збільшення приблизно на 30% тривалості імпульсу струму і силового імпульсу – величина збільшується з 0,56 до 0,7 мс. Приблизно на стільки ж збільшується і амплітудне значення електромагнітної сили. При цьому величина механічного імпульсу сили (добуток середньої сили на час), що визначає кінцеву швидкість прискорюваного тіла або фрагмента конструкції, зростає ще у більшому ступені.

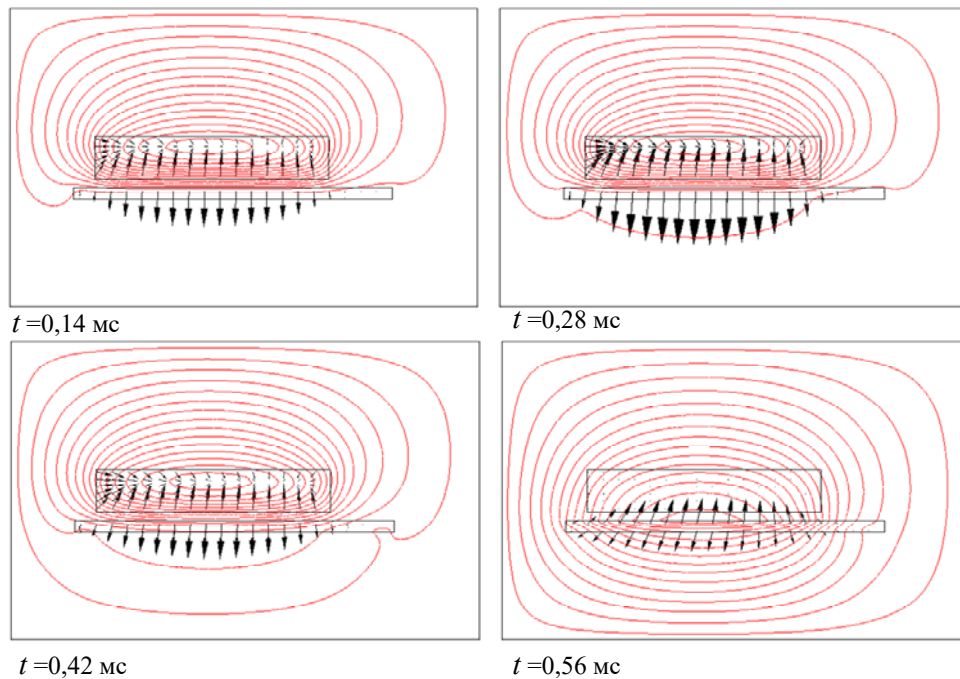


Рис. 4

Розподіл об'ємної щільності електромагнітної сили в перетині індуктора і пластини, а також силові лінії магнітного поля в різні моменти часу показані на рис. 5.

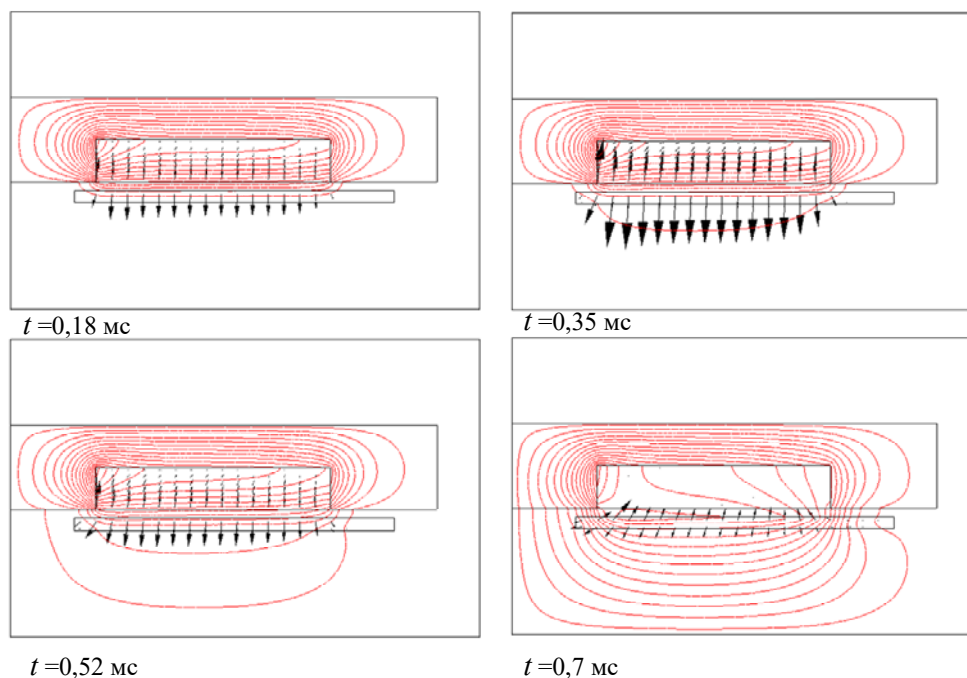


Рис. 5

Видно, що наявність магнітопроводу істотно розвантажує провідники індуктора від силового впливу, а значна частина такого силового впливу прикладена переважно до поверхні магнітопроводу у вигляді поверхневих магнітних сил. Ця обставина підвищує надійність роботи такої системи, яка визначається, в основному, стійкістю ізоляції індуктора до імпульсних силових навантажень. Також, як і у випадку випромінювача без

магнітопроводу, в кінці процесу на внутрішній стороні пластини з'являються вектори об'ємної щільності електромагнітних сил, спрямовані до індуктора. Зазначимо, що у даному випадку, як і у випадку збудника без магнітопроводу, в моменти часу переходу розрядного струму через нуль ( $t = 0,7$  мс і  $0,56$  мс) розподіл поля визначається струмами в провідній пластині, що і показано на рис. 5.

**Висновки.** У роботі проведено чисельний кінцево-елементний аналіз електромагнітних процесів в імпульсному електродинамічному випромінювачі для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях для двох варіантів його конструктивного виконання – без шихтованого магнітопроводу та з магнітопроводом, в пазу якого розташований індуктор.

За результатами комп'ютерних розрахунків, проведених на основі коло-польової моделі випромінювача, показано, що електромагнітна сила, яка діє на струмопровідну пластину протягом першої напівхвилі розрядного струму, змінюється у часі як функція, близька до дзвіноподібної, що важливо для здійснення діагностики бетонних конструкцій. Наявність магнітопроводу при одних і тих самих параметрах розрядного кола, розмірах індуктора і пластини призводить до збільшення тривалості та амплітуди силового імпульсу приблизно на 30%. Також у разі використання випромінювача з магнітопроводом відбувається перерозподіл електромагнітних сил так, що провідники індуктора розвантажуються від дії таких сил, а магнітопровід зазнає значного силового навантаження.

Отримані силові характеристики є основою для подальшого розрахунку хвильового механічного процесу в досліджуваних бетонних конструкціях при створенні в їхньому об'ємі пружних коливань із застосуванням електродинамічних випромінювачів.

1. Барашиков А.Я., Городжа А.Д. Интегральная оценка качества железобетонных конструкций с помощью эхо-метода. *Сборник научных трудов. Надежность и долговечность машин и сооружений*. 1988. Вып. 14. С. 37-46.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
3. Ивашин В.В., Карковский Л.И. Выбор рациональной геометрии магнитопровода индукционно-динамического двигателя с немагнитным якорем. *Электротехника*. 1981. № 8. С. 30-33.
4. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типа. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 46-48.
5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
6. Bissal A. Modeling and Verification of Ultra-Fast Electro-Mechanical Actuators for HVDC Breakers. PhD Thesis, Stockholm, Sweden, 2015. 147 p.
7. Рой Н.А. Импульсные электродинамические излучатели. *Акустический журнал*. 1970. Том XVI. Вып. 1. С. 121-128.
8. Ращепкин А.П. Импульсные электродинамические силы в многовитковом торцевом цилиндрическом индукторе. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 64–70.

УДК 620.171/1; 621.313; 536.2

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

К.А. Городжа<sup>1</sup>, канд.техн.наук, А.Д. Подольцев<sup>2</sup>, докт.техн.наук, Б.А. Трощинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- Киевский национальный университет строительства и архитектуры,  
пр. Воздухофлотский, 31, Киев, 03037, Украина.

Е-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohdant@gmail.com](mailto:bohdant@gmail.com).

<sup>2</sup>- Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

Е-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua).

*Проведен численний кінцево-елементний аналіз електромагнітних процесів в імпульсному електродинамічному излучателе для возбуждения упругих колебаний в бетонных конструкциях для двух вариантов его конструктивного исполнения – без шихтованного магнитопровода и с магнитопроводом, в пазу которого расположен многовитковый индуктор. При этом рассматривается цепе-полевая модель, учитывающая зависимость разрядного тока емкостного накопителя от характера диффузии магнитного поля в объеме токопровода.*

водящей пластины. Показано, что электромагнитная сила, действующая на эту пластину в течение первой полуволны разрядного тока, изменяется во времени как функция, близкая к колоколообразной, что важно для осуществления диагностики бетонных конструкций. Наличие магнитопровода при одних и тех же параметрах разрядной цепи, размерах индуктора и пластины приводит к увеличению продолжительности и амплитуды силового импульса примерно на 30%. Также при использовании магнитопровода происходит перераспределение электромагнитных сил так, что проводники индуктора разгружаются от их действия, а магнитопровод испытывает значительную силовую нагрузку. Библ. 8, рис. 5.

**Ключевые слова:** импульсный электродинамический излучатель, разрядный ток, электромагнитная сила, волновые механические процессы, диагностика, бетонные конструкции.

## ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN PULSED ELECTRODYNAMIC EMITTER TO EXCITE ELASTIC VIBRATIONS IN CONCRETE STRUCTURES

К.А. Gorodzha<sup>1</sup>, A.D. Podoltsev<sup>2</sup>, B.O. Troshchynskyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- Kyiv National University of Construction and Architecture,  
pr. Vozdukhoflotskyi, 31, Kyiv, 03037, Ukraine.

E-mail: [gorodzha@knuba.edu.ua](mailto:gorodzha@knuba.edu.ua); [bohiant@gmail.com](mailto:bohiant@gmail.com)

<sup>2</sup>- Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua).

*The finite element analysis of electromagnetic processes in the pulsed electrodynamic emitter intended to excite elastic vibrations in concrete structures is carried out for two design variants including the emitter without laminated magnetic core and with the magnetic core having multi-turn inductor in its slot. For these cases, the field-circuit model is considered. The model takes into account the dependence of the discharge current of capacitor on the magnetic field diffusion in a conductive plate. It is shown that the electromagnetic force acting on this plate during the first half-wave of the discharge current varies in time as a bell-shaped function. That is important for concrete structures diagnostics. The availability of a magnetic core with the same parameters of the discharge circuit, the dimensions of the inductor and the plate leads to the increase in the duration and amplitude of power pulse by about 30%. Moreover, when using a magnetic core, the redistribution of electromagnetic forces occurs so that the inductor conductors are unloaded from the forces action, and the magnetic core is subject to a significant force. References 8, figures 5.*

**Key words:** pulsed electrodynamic emitter, discharge current, electromagnetic force, wave mechanical processes, diagnostics, concrete structures.

1. Barashnikov A.Ya., Gorodzha A.D. Integral quality assessment of reinforced concrete structures using the echo method. *Sbornik nauchnykh trudov. Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzhenii*. 1988. Issue 14. Pp. 37-46. (Rus)
2. Knopfel H. Pulsed high magnetic fields. North-Holland Publishing company. 1970. 392 p.
3. Ivashin V.V., Karkovsky L.I. The choice of the rational geometry of the magnetic induction-dynamic motor with a nonmagnetic core. *Elektrotehnika*. 1981. No 8. Pp. 30-33. (Rus)
4. Bolyukh V.F., Olekseenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical transducers of electromagnetic and induction type. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 46-48. (Rus)
5. Belyi I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. Handbook of magnetic pulse metal processing. Kharkov: Vyshcha shkola, 1977. 168 p. (Rus)
6. Bissal A. Modeling and Verification of Ultra-Fast Electro-Mechanical Actuators for HVDC Breakers. PhD Thesis, Stocholm, Sweden, 2015. 147 p.
7. Roy N.A. Pulsed electrodynamic radiators. *Akusticheskii zhurnal*. 1970. Volume XVI. Issue 1. Pp. 121-128. (Rus)
8. Rashchepkin A.P. Pulsed electrodynamic forces in a multi-turn end cylindrical inductor. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2018. Issue 51. Pp. 64-70. (Rus)

Надійшла 02.01.2019  
Остаточний варіант 22.01.2019