

Вплив галтелі на роботу ультразвукового ступінчастого трансформатора коливальної швидкості

А. В. Мовчанюк¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2901-0424>

О. Ф. Луговський¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1076-7718>

А. В. Шульга¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6884-6518>

А. А. Новосад¹ - ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0598-6828>

Received: 3 November 2025 / Revised 20 November 2025 / Accepted: 20 December 2025

Анотація. У даній роботі представлено результати чисельного дослідження впливу геометричних параметрів, зокрема радіуса галтелі, на динамічні характеристики ультразвукового ступінчастого трансформатора коливальної швидкості. Подібні трансформатори застосовуються у високочастотних електромеханічних системах для узгодження акустичних імпедансів між перетворювачем та навантаженням, а також для підвищення амплітуди механічних коливань. Моделювання здійснювалося із використанням методу скінченних елементів (FEM), який забезпечує можливість урахування просторового розподілу напружень та деформацій у робочому об'ємі трансформатора. Проведено аналіз впливу діаметра та акустичної довжини окремих ступенів трансформатора на його резонансну частоту та коефіцієнт підсилення. Встановлено, що збільшення діаметра призводить до зниження резонансної частоти, тоді як зростання радіуса галтелі спричиняє її підвищення. Отримано кількісні залежності між радіусом галтелі, коефіцієнтом трансформації та резонансною частотою, що дають змогу здійснювати наближене визначення оптимальних конструктивних параметрів. Показано, що збільшення радіуса галтелі сприяє зменшенню концентрації механічних напружень у зоні переходу між ступенями, що, у свою чергу, підвищує втомну міцність конструкції. Запропоновано емпіричну залежність для попереднього визначення радіуса галтелі, яка дозволяє забезпечити відповідність фактичної резонансної частоти розрахунковим значенням. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та оптимізації ультразвукових підсилювальних систем і перетворювачів, що застосовуються в технологіях ультразвукового зварювання, оброблення матеріалів та модифікації поверхневих шарів.

Ключові слова: ультразвук, трансформатор коливальної швидкості, галтель, резонансна частота, коефіцієнт підсилення, метод скінченних елементів.

Вступ

Інтенсивні ультразвукові коливання знаходять широке застосування в різноманітних технологічних процесах, що протікають в рідинах або твердих тілах [1]. В рідинах розповсюдження ультразвукових коливань супроводжується вторинними ефектами, наприклад, ультразвуковою кавітацією, що і спричиняє інтенсифікацію хіміко-технологічних процесів [2]. В твердих тілах під дією інтенсивного ультразвуку можливе зварювання пластмас [3] або металів [4], [5]. Дещо окремо стоїть застосування ультразвуку для зміцнення поверхонь металів та зварних з'єднань віброударною обробкою [6], [7]. Всі ці технології об'єднує подібна конструк-

ція електромеханічного перетворювача, що являє собою пакетний перетворювач Ланжевена з під'єднаним трансформатором коливальної швидкості, що одночасно слугує для узгодження імпедансів навантаження та перетворювача, а також для підняття амплітуди коливань до рівня, необхідного для отримання технологічного ефекту.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні відомо багато типів ультразвукових трансформаторів коливальної швидкості. Всі вони, в більшості випадків, представляють собою тіло обертання зі змінною по довжині площею перерізу. Найбільш технологічним є ступінчастий трансформатор коливальної швидкості (рис. 1), що складається з двох відрізків стрижнів постійного перерізу. Кожен відрізок має довжину у чверть хвилі на робочій частоті.

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, Київ, Україна, <https://ror.org/00syn5v21>

✉ А.В. Мовчанюк
movchanuk@rtf.kpi.ua



Для зменшення амплітуди механічних напружень в місці з'єднання стрижнів робиться галтель.

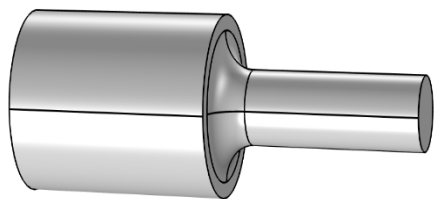


Рис. 1. Ультразвуковий ступінчастий трансформатор коливальної швидкості

Існує два основних підходи до аналізу роботи трансформаторів коливальної швидкості. Аналітичний [1], [2], [8], при якому вирішується хвильове рівняння для стрижнів, а впливом галтелі нехтують. При цьому задача про коливання розглядається як одновимірною. Аналітичний [9], при якому враховуються попереківі коливання стрижня. А також аналіз поведінки трансформатора коливальної швидкості методом кінцевих різниць [9], [10] за відомими розмірами. Аналітичними методами важко врахувати вплив галтелі, особливо коли відбувається спотворення хвилі, а метод кінцево-елементного аналізу вимагає вже відомих розмірів трансформатора.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є вивчення впливу радіусу галтелі, акустичних довжин та діаметрів ступенів акустичного трансформатора коливальної швидкості на його резонансну частоту та коефіцієнт підсилення. Для цього необхідно вивчити вплив діаметрів та акустичних довжин на розподіл ультразвукових коливань в об'ємі.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження доцільно проводити методом скінчених елементів (FEM), що довів свою ефективність

для вирішення аналогічних задач [11]–[13]. В якості матеріалу стрижнів доцільно використовувати сталь AISI 4130 стандарт ASTM A29/SAE J404, що за механічними та акустичними властивостями наближена до сталі 30ХГСА. З практичної точки зору, особливий інтерес становить перевірка поведінки акустичного ступінчастого трансформатора в межах резонансної частоти 22 кГц (рис. 2).

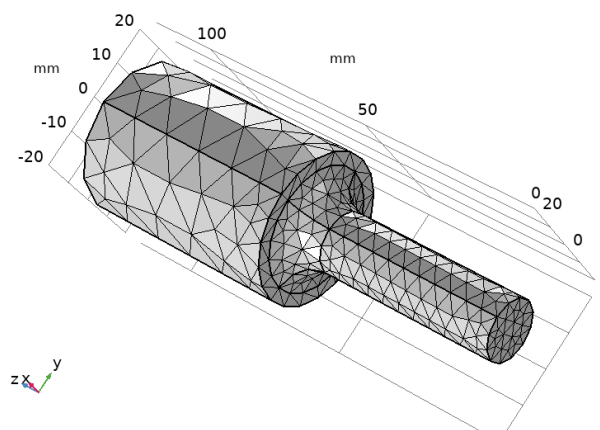


Рис. 2. Приклад FEM моделі ступінчастого трансформатора коливальної швидкості

Результати дослідження

При моделюванні розподілу амплітуди коливань в стрижні довжиною 118 мм (рис. 3), що відповідає половині довжини хвилі на частоті 22 кГц, видно, що фронт стоячої хвилі не є плоским (рис. 4). Відповідно, повинно спостерігатися відхилення резонансної частоти, що була обрахована для плоского фронту повздовжньої хвилі. Однак, (табл. 1) вимірювання резонансних частот при однаковій довжині стрижня в залежності від діаметру показує, що фактичне відхилення лежить в межах 2,05 %. Не дивлячись на суттєве спотворення фронту хвилі при збільшенні діаметру (рис. 2), можна стверджувати, в першому наближенні, що відхилення резонансної частоти стрижня не перевищує

Таблиця 1. Розрахунок питомої енергоємності

Діаметр стрижня, мм	10	20	30	40	50	60	70
Резонансна частота, Гц	22100	22075	22033	21971	21888	21780	21643
Абсолютне відхилення частоти, Гц	100	75	33	29	112	220	357
Відносне відхилення частоти, %	+0,45	+0,34	+0,15	−0,13	−0,5	−1	−1,6

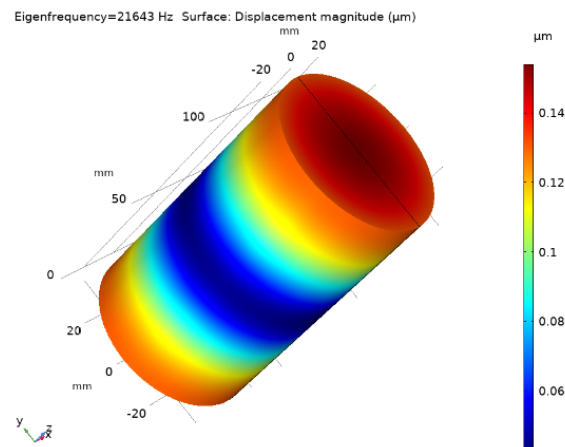


Рис. 3. Розподіл амплітуди коливань на поверхні стрижня діаметром 70 мм на частоті 22 кГц

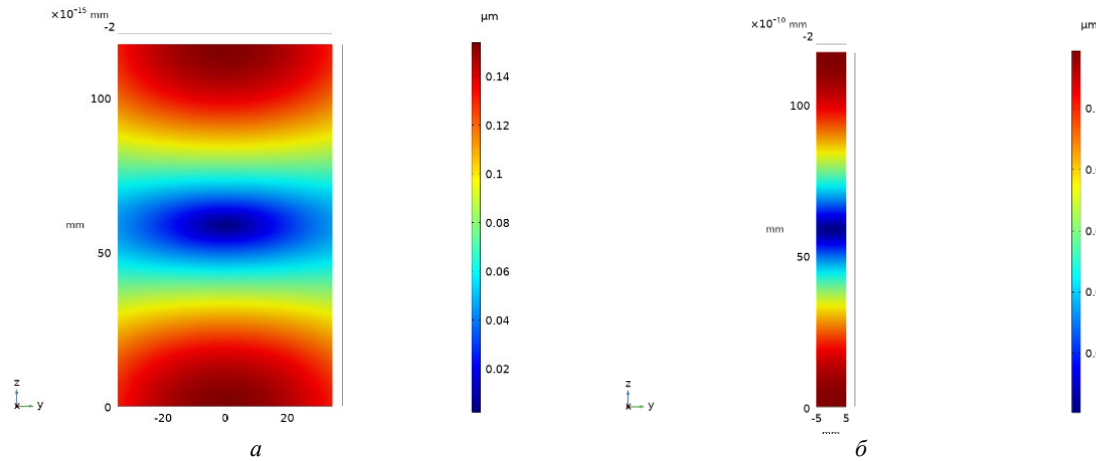


Рис. 4. Розподіл амплітуди коливань в стрижні діаметром 70 мм (а) та 10 мм (б)

Таблиця 2. Залежність коефіцієнта трансформації та резонансної частоти від діаметра стрижня

Завданий коефіцієнт трансформації	Діаметр стрижня 10 мм			Діаметр стрижня 40 мм			Діаметр стрижня 70 мм		
	Коефіцієнт трансформації	Відхилення, %	Резонансна частота, Гц	Коефіцієнт трансформації	Відхилення, %	Резонансна частота, Гц	Коефіцієнт трансформації	Відхилення, %	Резонансна частота, Гц
2	1,977	1,15	21944	1,95	2,5	21335	1,854	7,3	20721
5	4,99	0,2	21755	4,85	3	20661	4,643	7,14	19573
8	7,98	0,25	21740	7,71	3,65	20553	7,68	4	19430

відхилення швидкості звуку в матеріалі стрижня, яка залежить від термічної обробки.

Дослідимо вплив діаметрів складових частин стрижня (рис. 5) на частоту власних коливань та коефіцієнт трансформації (табл. 2). Як бачимо, відносне від-

хилення коефіцієнта трансформації збільшується із зростанням діаметру стрижня з одночасним зниженням резонансної частоти. Це можна проілюструвати зміною розподілу ультразвукових коливань по перерізу стрижня (рис. 6).

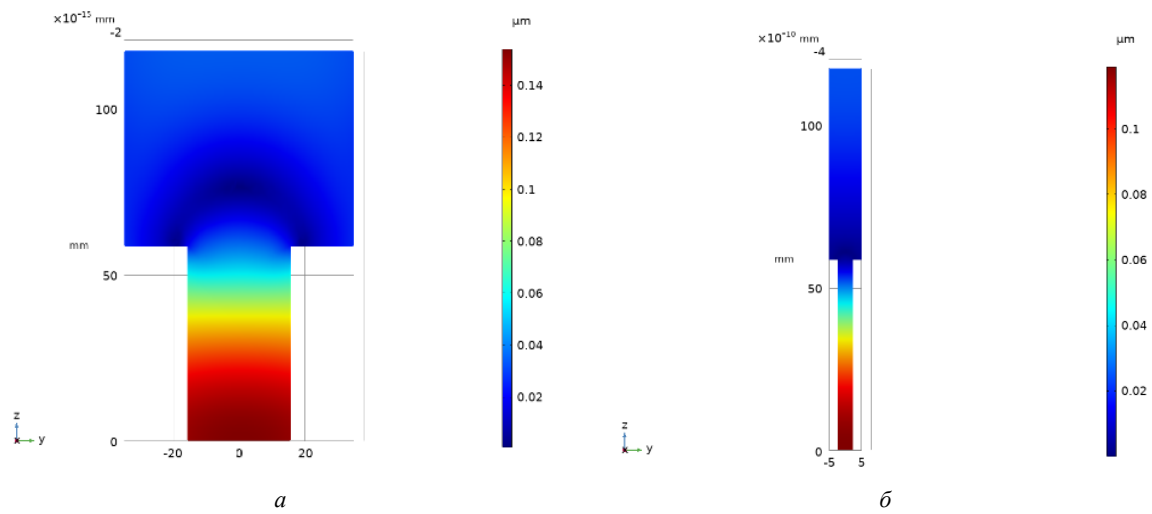


Рис. 5. Розподіл амплітуди коливань в стрижні діаметром 70 мм (а) та 10 мм (б) при однакових коефіцієнтах трансформації, що дорівнює 5

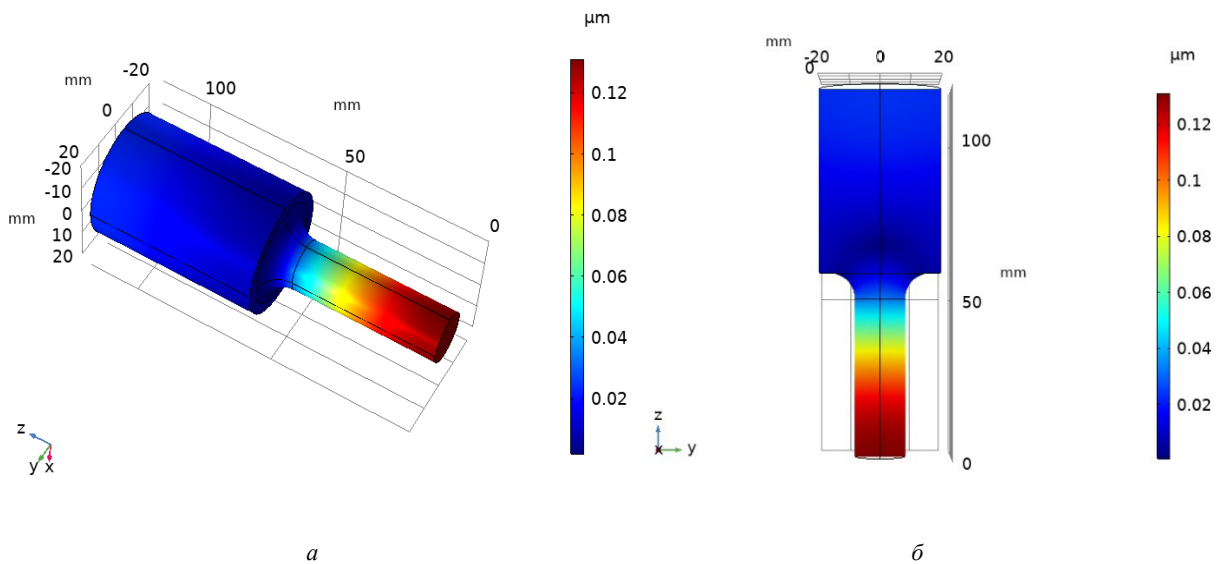


Рис. 6. Розподіл амплітуди коливань в трансформаторі на поверхні (а) та повздовжньому перерізі (б)

Таблиця 3. Залежність коефіцієнта підсилення від радіусу галтелі

Коефіцієнт трансформації без галтелі	Радіус галтелі по відношенню до діаметру стрижня				
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
2	1,95	1,94	1,93	1,92	1,91
4	3,86	3,85	3,81	3,76	3,69
6	5,78	5,75	5,7	5,63	5,52
8	7,69	7,66	7,6	7,52	7,34
10	9,6	9,57	9,5	9,4	9,27

Таблиця 4. Залежність резонансної частоти від радіусу галтелі

Коефіцієнт трансформації	Радіус галтелі по відношенню до діаметру стрижня					
	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
2	21331	21501	21924	22173	22345	22475
4	20696	20877	21421	22021	22533	22919
6	20534	20714	21206	21768	22372	22944
8	20502	20670	21119	21637	22200	22797
10	20512	20676	21086	21570	22088	22644

Обговорення результатів дослідження

Аналіз результатів впливу радіусу галтелі на коефіцієнт підсилення (табл. 3) є цілком очікуваним. За рахунок галтелі зменшуються механічні напруження в місці переходу частини більшого діаметру трансформатора в частину меншого діаметру, що призведе до збільшення межі втомної міцності.

З резонансною частотою справа дещо інша. Як видно з результатів дослідження, фронт хвилі відрізняється від плоского. Відповідно додавання галтелі ще більше спотворює форму хвилі в точці переходу. Це призводить до того, що пучність механічних напружень (або вузол амплітуди коливань) стягується до центру. Відповідно, наявність галтелі, за рахунок викривлення фронту хвилі, призводить до підвищення резонансної частоти. В результаті на відхилення резонансної частоти від розрахункової буде одночасно

впливати коефіцієнт трансформації (відношення діаметрів стрижнів) і радіус галтелі (по відношенню до діаметру стрижня) (рис. 7).

Одночасний вплив декількох факторів значно ускладнює розрахунки. В результаті аналізу даних табл. 4 було встановлено, що резонансна частота акустичного трансформатора наближена до розрахункової при:

$$R = [1 - K^{-0,4}] \cdot D_1,$$

де: R – радіус галтелі, K – коефіцієнт трансформації ступінчастого трансформатора, D_1 – діаметр тонкої частини ступінчастого трансформатора.

Розрахунок радіусу галтелі по наведеній формулі дозволяє отримати перше наближення визначення необхідного радіусу, що дозволяє ітераційним методом отримати необхідну робочу частоту.

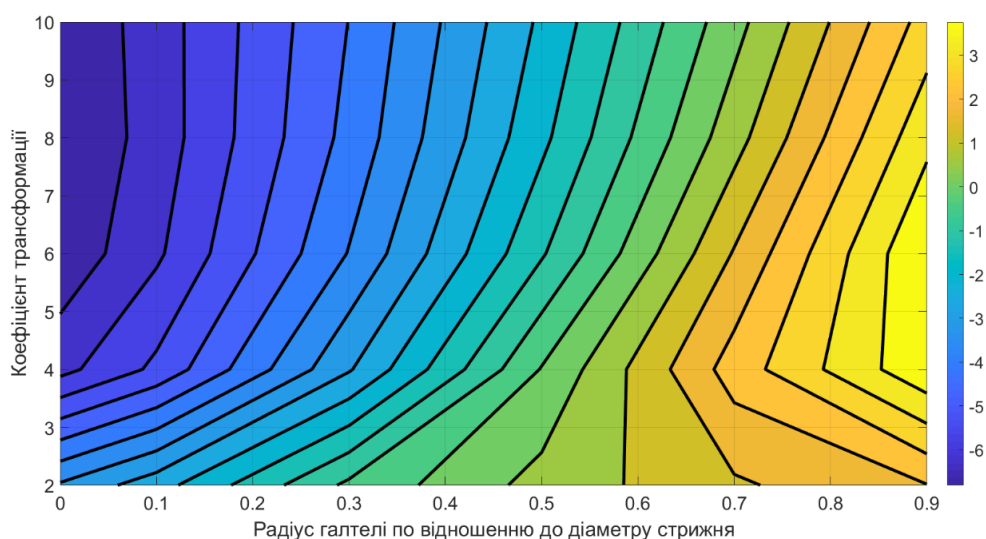


Рис. 7. Відносне відхилення резонансної частоти від розрахункової у % від коефіцієнта трансформації та відносного радіусу галтелі

Висновки

В роботі було досліджено вплив радіусу галтелі на характеристики ступінчастого трансформатора коливальної швидкості. Перехід від стрижня постійного перерізу до ступінчастого трансформатора швидкості знижує резонансну частоту. Це пов'язано з викривленням фронту розподілу коливань по об'єму стрижня. Причому, чим більший розрахунковий коефіцієнт трансформації, тим більше відхилення від розрахункової резонансної частоти. Було встановлено, що збільшення радіусу галтелі зменшує коефіцієнт трансформації. Збільшення радіусу галтелі призводить до зростання резонансної частоти. Для кожного коефіцієнта трансформації можна знайти радіус галтелі при якому отримана резо-

нансна частота співпадає з розрахунковою. Запропоновано емпіричну формулу, що дозволяє оцінити перше наближення для пошуку радіусу галтелі, що дозволяє досягти розрахункової резонансної частоти.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] A. Gallego-Juárez, K. F. Graff and M. Lucas, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Woodhead Publishing, 2023. ISBN: 978-0-323-85144-2.
- [2] O. F. Luhovskiy, A. V. Movchanyuk, I. M. Bernyk, A. V. Shulha and I. A. Hryshko, *Apparatne zabezpechennia ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021, [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/items/880c19df-9b97-45cd-bd4b-b0a6384862ab>.
- [3] Y. Bai and Y. Chen, "Research on ultrasonic plastic flexible welding equipment for automobile steering wheel," in *2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME)*, Suzhou, China, 2020, pp. 264–269, doi: <https://doi.org/10.1109/ICEDME50972.2020.00067>.
- [4] C. Gao and Y. Xing, "Ultrasonic Metal Welding Technology of Cascaded Battery Connection," in *2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE)*, Xiamen, China, 2019, pp. 28–31, doi: <https://doi.org/10.1109/EITCE47263.2019.9094804>.
- [5] M. Acharya and V. Badheka, "Application of Ultrasonic Welding for Dissimilar Metals: A Review," in: Dikshit, M.K., Khanna, N., Soni, A., Markopoulos, A.P. Eds., *Advances in Manufacturing Engineering. ICFAMMT 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-97-4324-7_20.
- [6] G. Xu et al., "Study on the Effects of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure and Properties of 316L Laser Welded Joints," *J. of Materi Eng. and Perform*, Vol. 34, pp. 23877–23890, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11129-1>.
- [7] F. Chen, Y. Yang and N. Li, "Effect of ultrasonic impact time on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy tandem MIG welded joint," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 116, pp. 2687–2696, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07599-x>.
- [8] O. Lugovskiy, A. Movchanyuk and V. Fesich, "To the question about the calculation of the ultrasonic step-up transformer of vibrating speed with the developed radiance surface", *Mech. Adv. Technol.*, no. 1(85), pp. 49–56, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.164346>.
- [9] A. Y azdian and M. R. Karafi, "An analytical approach to design horns and boosters of ultrasonic welding machines," *SN Appl. Sci.*, Vol. 4, 166, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05044-6>.
- [10] D. Krishnakumar and S. Periyannan, "Design and Magnification Factor Analysis of Multi-linear Stepped Ultrasonic Horn for Machining Application Using FEM Approach", In: Ghose, B., Manoharan, V., Mulaveesala, R. Eds., *Advances in Non-Destructive Evaluation (NDE). NDE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1036-2_14.
- [11] Jagadish and A. Ray, "Design and performance analysis of ultrasonic horn with a longitudinally changing rectangular cross section for USM using finite element analysis," *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 40, 359, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1281-7>.
- [12] K. Anand and S. Elangovan, "Studies on dynamic characteristic of stepped horn utilized in ultrasonic insertion process using finite element analysis and experimental methods," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, Part 17, pp. 8165–8171, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.110>.
- [13] A. S. Nanu, N. I. Marinescu and D. Ghiculescu, "Study on ultrasonic stepped horn geometry design and FEM simulation," *Nonconventional Technologies Review*, vol. XV, no. 4, pp. 25–30, 2011. [Online]. Available: https://revtn.ro/_legacy/pdf4-2011/05%20-%20Nanu%20-%20Study%20On%20Ultrasonic%20Stepped%20Horn%20Geometry%20Design%20And%20FEM%20Simulation%20.pdf

- [14] A. Gallego-Juárez, K. F. Graff and M. Lucas, Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound, 2nd ed. Oxford, U.K.: Woodhead Publishing, 2023. ISBN: 978-0-323-85144-2. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/291859299_Power_Ultrasonics_Applications_of_High-Intensity_Ultrasound.

Influence of the Fillet Radius on the Performance of an Ultrasonic Stepped Velocity Transformer

Andrii Movchanyuk¹ • Oleksandr Luhovskyi¹ • Alina Shulha¹ • Andrii Novosad¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. This study presents the results of a numerical investigation into the influence of geometric parameters, particularly the fillet radius, on the dynamic characteristics of an ultrasonic stepped velocity transformer. Such transformers are employed in high-frequency electromechanical systems to match the acoustic impedances between the transducer and the load, as well as to increase the amplitude of mechanical vibrations. Modeling was carried out using the finite element method (FEM), which enables consideration of the spatial distribution of stresses and strains within the transformer volume. The effects of the step diameter and acoustic length on the resonance frequency and amplification coefficient were analyzed. It has been established that an increase in the step diameter leads to a decrease in the resonance frequency, whereas an increase in the fillet radius results in its rise. Quantitative relationships between the fillet radius, transformation coefficient, and resonance frequency were obtained, allowing for approximate determination of optimal design parameters. It was shown that enlarging the fillet radius reduces stress concentration in the transition zone between steps, thereby enhancing the fatigue strength of the structure. An empirical relationship was proposed for preliminary estimation of the fillet radius to ensure agreement between the actual and the calculated resonance frequencies. The results obtained can be applied in the design and optimization of ultrasonic amplification systems and transducers used in ultrasonic welding, material processing, and surface modification technologies.

Keywords: ultrasound, velocity transformer, fillet radius, resonance frequency, amplification coefficient, finite element method.
