

## ШИРОКОСМУГОВИЙ ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ ФАЗОЗСУВАЧ ВІДБИВНОГО ТИПУ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

### *Анотація*

*Розглянуто широкосмуговий диференційний фазозсувач відбивного типу із різницею фаз  $\pm 90^\circ$  у робочій смузі частот від 2 до 8 ГГц. Така конструкція може забезпечити фазові зсуви  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  та  $\pm 90^\circ$  із відхиленням не більше  $1.8^\circ$ .*

**Ключові слова:** фазозсувач, відгалужувач, зворотні втрати, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт передачі.

### *Abstract*

*A broadband differential phase shifter of the reflective type with a phase difference of  $\pm 90^\circ$  in the operating frequency band from 2 to 8 GHz is considered. This design can provide phase shifts of  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  and  $\pm 90^\circ$  with a deviation of not more than  $1.8^\circ$ .*

**Keywords:** phase shifter, coupler, return loss, reflective coefficient, transmission coefficient.

### Вступ

Останнім часом широкого поширення набувають конструкції широкосмугових фазозсувачів [1-8]. Фазозсувачі є одними з основних елементів, що використовуються в елементах живлення антен. Крім використання в антенних системах, вони широко використовуються в різних пристроях НВЧ, таких як циркулятори та ізолятори. Крім того, вони використовуються в системах колової поляризації [9,10] та ортомодових перетворювачах [11-13].

Фазозсувачі використовують для контролю напрямку випромінювання сигналу, щоб покращити його властивості у визначеному напрямку. Для цього фазозсувачі вводять задану величину часової затримки або фази на визначеній частоті у сигналі, що через них проходить. Таким чином, регулюючи фази та амплітуди сигналів, що передаються, можна зменшити випромінювання в небажаних напрямках та підсилити випромінювання в заданому напрямку. Тоді дослідження фазозсувачів є актуальним у багатьох НВЧ системах.

Сфера застосувань фазозсувачів є керування відносною фазою кожного елемента в антенній решітці в радарі або керованій лінії зв'язку, в контурах подавлення, що є у підсилювачах із високою лінійністю.

Багато робіт було присвячено дослідженню конструкції фазозсувачів [1, 4, 7,8, 14], але ще більше роботи було присвячено покращенню їх характеристик [2,5, 15-18] для розширення смуги пропускання, зменшення фази пульсації, зменшення їх втрат. Фазозсувачі можна поділити на два типи залежно від того, як керувати фазовим зсувом: фазозсувачі з механічним керуванням та фазозсувачі з електронним керуванням. Останні набувають широкого поширення, особливо в фазованих антенних решітках [19-26]. Таким чином, задача проектування фазозсувачів широкою смугою пропускання та мінімальними втратами є актуальною.

Найбільша кількість робіт присвячені феритовим фазозсувачам [27-30], але всі вони мають вузький діапазон частот, роботи [38-44] розглядають інші типи фазозсувачів.

Щілинні структури фазозсувачів [31], що мають невелике відхилення фази та малі розміри, та мікросмужкові диференціальні фазозсувачі [31-37] широко використовуються в сучасних системах зв'язку.

Широкопasmові диференційні фазозсувачі в основному базуються на конструкції Шифмана [33], що використовує пsmову передачу по краям. Але для широкопasmового зв'язку потрібен дуже вузький зазор між лініями, що з'єднані по краях. Тому у роботі [31] була запропонована конструкція у вигляді з'єднання мікросмужка-щілина-мікросмужка у вигляді широкопasmової структури еліптичної форми, що забезпечує хороші широкопasmові властивості.

### Результати дослідження

У роботі розглянуто широкопasmовий диференційний фазозсувач, що працює в смузі частот 2-8 ГГц. Для моделі фазозсувача використовується відбиваючі фазозсувачі. Для побудови використовується широкопasmовий гібридний відгалужувач, що має навантаження у вигляді зосередженої індуктивності або ємності.

На рис. 1 зображений диференційний фазозсувач відбивного типу. Нехай вхід 1 та вхід 2 для двох режимного відгалужувача у вигляді чотирьох портів будуть входом та виходом фазозсувача.

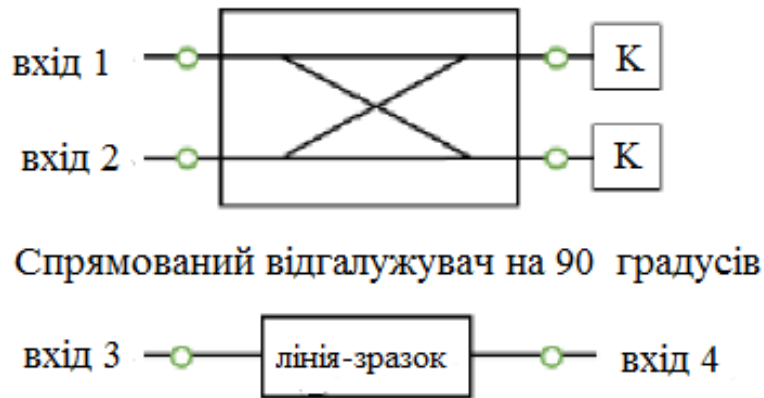


Рис. 1. Схема диференційного фазозсувача відбивного типу

Зв'язок між верхнім та нижнім каналами фазообертача визначаємо через відбиті хвилі

$$b_1 = \frac{jk \cdot \sin(\theta \cdot a_3) + a_4 \sqrt{1 - k^2}}{\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta};$$

$$b_2 = \frac{jk \cdot \sin(\theta \cdot a_4) + a_3 \sqrt{1 - k^2}}{\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta},$$

де  $\theta$  – електрична довжина з'єднувальної структури.

Електрична довжина пов'язана з фізичною співвідношенням

$$\theta = \beta_a \cdot l,$$

$$\beta_a = \frac{360^\circ}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r},$$

де  $\epsilon_r$  – діелектрична константа підкладки.

Для узгоджено виходу 2, відбиті сигнал на виходах 3 і 4 буде таким:

$$b_3 = \frac{jk \cdot \sin(\theta \cdot a_1)}{\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta};$$

$$b_4 = \frac{a_1 \sqrt{1 - k^2}}{\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta}.$$

Якщо виходи 3 і 4 відкриті, їх коефіцієнти відбиття дорівнюють одиниці, тому  $a_3 = b_3$  та  $a_4 = b_4$ . Таким чином, втрата повернення та вставки будуть:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1 - k^2[1 + \sin^2(\theta)]}{[\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta]^2},$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2kj[1 + \sin^2(\theta)]\sqrt{1 - k^2}}{[\cos \theta \sqrt{1 - k^2} + j \sin \theta]^2}.$$

Зсув фази між вихідним і вхідним сигналом визначається:

$$\varphi_{S_{12}} = 90^\circ - 2ctg\left(\frac{\tan\theta}{\sqrt{1-k^2}}\right).$$

Щоб знайти різницю фазового зсуву, ми повинні порівняти реакцію структури на відповідність лінії відліку. Таким чином, мікросмужкова лінія опором 50 Ом з фізичною довжиною  $l$ , постійною фазою  $\beta_{ВД}$  та ефективною діелектричною постійною  $\epsilon_{ЕФ}$  була обрана як опорна лінія з її фазою, вираженою як:

$$\varphi_{S_{34}} = -\beta_{ВД} \cdot l = -\frac{360^\circ \cdot l \cdot \sqrt{\epsilon_{ЕФ}}}{\lambda}.$$

Тоді загальний фазовий зсув фазозсувача визначається

$$\Delta\varphi = \varphi_{S_{12}} - \varphi_{S_{34}} = 90^\circ - 2ctg\left(\frac{\tan\theta}{\sqrt{1-k^2}}\right) - \frac{360^\circ \cdot l \cdot \sqrt{\epsilon_{ЕФ}}}{\lambda}.$$

Структура має створювати фазовий зсув  $\Delta\varphi = \pm 90^\circ$  у смузі частот 2–8 ГГц, а також інші зсуви фаз за рахунок зміни розмірів навантаження на входах відгалужувача. Таким чином, розраховані розміри навантаження для значень зсуву фаза на  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  та  $\pm 90^\circ$ . Коефіцієнти відбиття та перетину структур складають менше 10 дБ та 1 дБ відповідно. Відхилення фази у робочій смузі частот складають  $1.5^\circ$ ,  $1.1^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1.3^\circ$ ,  $1.1^\circ$ ,  $1.8^\circ$ ,  $1.35^\circ$  та  $1.6^\circ$  для фазозсувачів  $-90^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  та  $90^\circ$  відповідно. Таким чином, фазозсувачі мають пульсації фази менше  $1.8^\circ$  у смузі частот 125% ( $BW = \Delta f / f_0$ ) відносно центральної частоти. На рис. 2 та рис. 3 наведені залежності фазового зсуву, відхилення фази, коефіцієнта відбиття та коефіцієнта передачі від частоти.

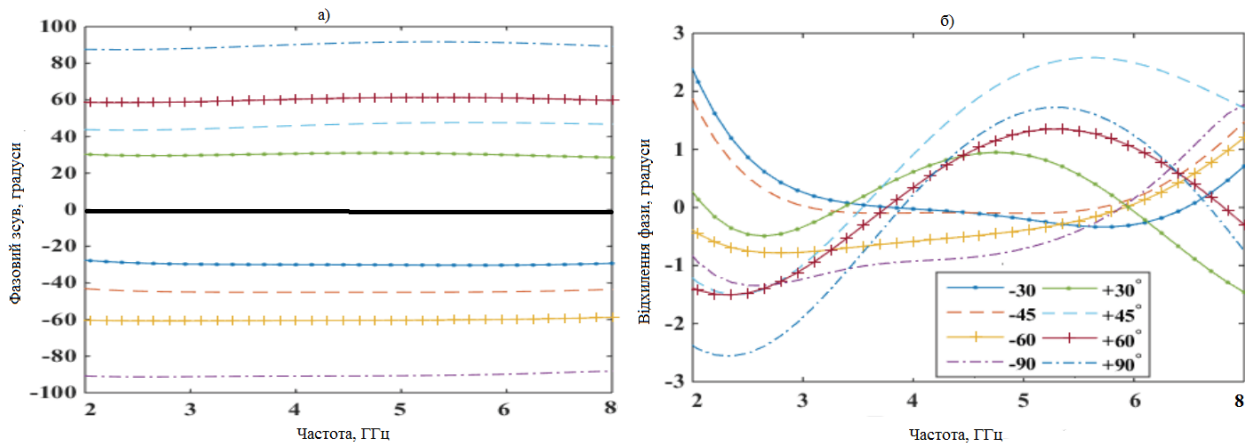


Рис.2. Залежність від частоти: а) фазового зсуву; б) відхилення фази

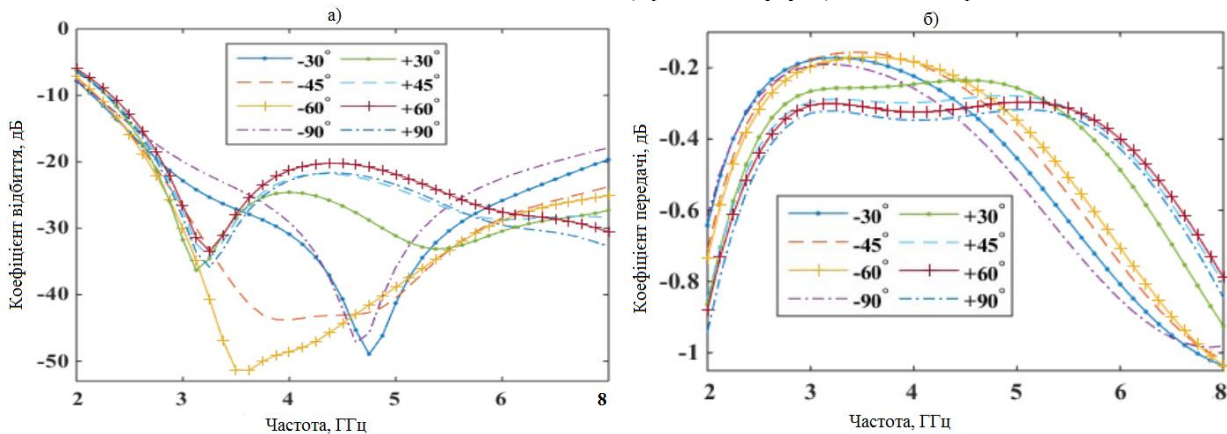


Рис.3. Залежність від частоти: а) коефіцієнта відбиття; б) коефіцієнта передачі

Отже, розглянутий широкосмуговий фазозсувач з необхідними характеристиками, такими як забезпечення зв'язку 3 дБ у смузі частот 2 - 8 ГГц з мінімальними оберненими втратами, фазою та відхиленням фази при максимізації робочої смуги пропускання. Цей проміжок частоти містить в собі смуги частот відомих радіотехнічних систем GPS, DCS, PCS, UMTS, WiBro, Bluetooth, S-DMB,

WiMax та WLAN. Також ці частоти використовуються у супутниковому зв'язку, мобільному зв'язку та морському зв'язку.

### Висновки

Таким чином, розглянутий фазозсувач з навантаженням у вигляді реактивності може створювати фазовий зсув  $\Delta\varphi = \pm 90^\circ$  в діапазоні частот 2 – 8 ГГц. Крім того, шляхом зміни величини навантаження можна отримати різні диференційні фазові зсуви:  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  та  $\pm 90^\circ$ . Результати моделювання показують, що максимум відхилення фази є  $1.8^\circ$ , а також обернені та внесені втрати менше 10 дБ та 1 дБ відповідно.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Geyikoglu M.D. Novel design for differential phase shifter structure by using multi-section coupled lines / M.D. Geyikoglu, H.K. Polat, B. Cavusoglu // *IEEE Electronics Letters*. – 2020. – Vol. 56, No. 11. – pp. 553–556. DOI: 10.1049/EL.2020.0316.
2. Zhang W. A compact single-layer balanced phase shifter with wide bandwidth and uniform reference line / W. Zhang, K. Xu, J. Shi, Z. Shen // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – pp. 41530–41536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2976730.
3. Oiu L.L. Balanced wideband phase shifters with good filtering property and common-mode superession / L.L. Qiu, L. Zhu // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2019. – Vol. 67, No. 6. – pp. 2313–2321. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2910108.
4. Liu Q. Compact ultra-wideband  $90^\circ$  phase shifters using short-circuited stub weak coupled line / Q. Liu, H. Liu, Y. Liu // *IEEE Electronics Letters*. – 2014. – Vol. 50, No. 20. – pp. 1454–1456. DOI: 10.1049/EL.2014.2271.
5. Dong Q. A compact single-layer ultra-wideband phase shifter using weakly coupled lines / Q. Dong, Y. Wu, Y. Zheng, W. Wang, Y. Liu // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – pp. 12575–12583. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2893372.
6. Li R. Synthesis design of ultra-wideband bandpass filters with composite series and shunt stubs / R. Li, S. Sun, L. Zhu // *IEEE Transactions Microwave Theory Techniques*. – 2009. – Vol. 57, No. 3. – pp. 684–692. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2013312.
7. Wang J. Design of a wideband differential phase shifter for large phase shifts application / J. Wang, S. Shang, D. Song, X. Li, X. Luo, D. Li // *International applied computational electromagnetic society symposium (ACES)*, 8-11 August 2019, Nanjing, China. DOI: 10.23191/ACES4853.2019.9060579.
8. Yeung S.H. Broadband  $90^\circ$  differential phase shifter constructed using a pair of multi-section radial line stubs / S.H. Yeung, Q. Xue, K.F. Man // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2012. – Vol. 60, no. 9. – pp. 2760–2767. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2204899.
9. Dubrovka F.F. Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay, R.R. Dubrovka, M.M. Lytvyn // *Radioelectronics and Communications*. – 2020. – Vol. 63, no. 1. – pp. 15–23. DOI: 10.3103/S073527220010021.
10. Piltyay S. I. High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system / S. I. Piltyay // *Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, pp. 284–287, May 2017.
11. Leal-Sevillano C. A. A 225 GHz circular polarization waveguide duplexer based on a septum orthomode transducer polarizer / C. A. Leal-Sevillano, K. B. Cooper, J. A. Ruiz-Cruz, J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* – 2013. – Vol.3, no.5. – p.574, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2013.2264317>.
12. Piltyay S. I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer / S. I. Piltyay // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2014. – № 57. – С. 35–42.
13. Мосьондз І.О. Хвилевідний ортомодовий перетворювач / І.О. Мосьондз, С.І. Пільтай // *Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року*. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 90–91.
14. Zhang W. A balanced phase shifter with common-mode suppression / W. Zhang, J. Shi // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2019. – Vol. 66, No. 1. – pp. 378–386. DOI: 10.1109/TIE.2018.2829675.

15. Lin Y.W. A balanced digital phase shifter by a novel switching-mode topology / Y.W. Lin, Y.C. Chou, C.Y. Chang // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2013. – Vol. 61, No. 6. – pp. 2361-2370. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2258170.
16. Zhang W. A compact wideband phase shifter using slotted substrate integrated waveguide / W. Zhang, Z. Shen, K.Xu, J. Shi // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2019. – Vol. 29, No. 12. – pp. 767-770. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2949681.
17. Yoon H.-J. Wideband 180° phase shifter using parallel-coupled three-line / H.-J. Yoon, B.-W. Min // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2019. – Vol. 29, No. 2. – pp. 89-91. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2886469.
18. An B. Wideband tunable phase shifter with low in-band phase deviation using coupled line / B. An, G. Chaudhary, Y. Jeong // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2018. – Vol. 8 No. 8. – pp. 678-680. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2847025.
19. D'Amato G. DDS-PLL phase shifter architectures for phased arrays: theory and techniques / G. D'Amato, G. Avitabile, G. Coviello, C.Talarico // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – pp. 19461-19470. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895388.
20. Rupakula B. Limited scan-angle phased arrays using randomly grouped subarrays and reduced number of phase shifters / B. Rupakula, A.H. Aljuhani, G.M. Rebeiz // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2020. – Vol. 68, no. 1. – pp. 70-80. DOI: 10.1109/TAP.2019.2935100.
21. Feng B. Dual-wideband dual-polarized metasurface antenna array for the 5G millimeter wave communications based on characteristic mode theory / B. Feng, X. He, J.-C. Cheng, C.-Y.-D. Sim // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – pp. 21598-21601. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968964.
22. Ma J. Ultra-broadband phase shifter for 5G mobile applications / J. Ma // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2020. – Vol. 68, no 2. – pp. 530-541. DOI: 10.1109/TMTT.2020.2965850.
23. Булашенко А. В. Багатопроблені антенні решітки на основі лінз Ротмана / А.В. Булашенко // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. – 2010– № 42. – С. 178-186. doi: 10.20535/RADAP.2010.42.178-186.
24. Булашенко. А.В. Принципи формування променя інтелектуальних антен / А.В. Булашенко // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. – 2010. – №1. – С. 111-120.
25. Булашенко А.В. Модифікований алгоритм для цифрового формування діаграми спрямованості антенних решіток / А.В. Булашенко // 5-а Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікації РТ-2009», 20-25 квітня 2009р, Севастополь, Україна. – с. 167.
26. Булашенко А. В. Живлення антенних решіток на основі лінз Ротмана (огляд) / А. В. Булашенко, Ф. Ф. Дубровка // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. – 2010. – №3, Т.2. – С. 113-120.
27. Abdelaal M.A. Rectangular wideband differential phase shifters based on horizontal ferrite tiles: accurate model for full-band operation / M.A. Abdelaai, S.I. Shams, A. A. Kishk // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – pp. 23766–23778. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2899567.
28. Babbitt R. Fabrication and performance of ferrite phase shifters for millimeter frequencies / R. Babbitt, R. Stern // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1979. – Vol. 15, no. 6. – pp. 1744–1746. DOI: 10.1109/TMAG.1979.1060374.
29. Ghaffar F.A. Theory and design of a half-mode SIW ferrite LTCC phase shifter / F.A. Ghaffar, A. Shamim // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 17-22 May 2015, Phoenix, USA. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166932.
30. Ghaffar F.A. Theory and design of a half-mode SIW ferrite LTCC phase shifter / F.A. Ghaffar, A. Shamim // *IEEE Transactions on magnetic*. – 2013. – Vol. 49, no. 7. – pp. 3882-3885. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2244860.
31. Abbosh A.M. Ultra-wideband phase shifters / A. M. Abbosh // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2007. – Vol. 55, No. 9. – pp. 1935–1941. DOI: 10.1109/TMTT.2007.904051.
32. Kirilenko A. A. Compact 90° twist formed by a double-corner-cut square waveguide section / A.A. Kirilenko, D. Y. Kulik, L. A. Rud // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. – Vol. 56, no. 7. – pp. 1633–1637.

33. Schiffman B.M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters / B. M. Schiffman // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1958. – Vol. 6, No. 2. – pp. 232–237. DOI: 10.1109/TMTT.1958.1124543.
34. Shelton J. P. Synthesis and design of wide-band equal-ripple TEM directional couplers and fixed phase shifters / J. P. Shelton, J. A. Mosko // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1966. – Vol. 14, No. 10. – pp. 462- 473. DOI: 10.1109/TMTT.1966.1126305.
35. Guo Y.X. Improved wide-band Schiffman phase shifter / Guo Y.X., Z.-Yu Zhang, L. Ch. Ong // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54, No. 3. – pp. 1196-1200. DOI: 10.1109/TMTT.2005.864105.
36. Sorn M. Simulation and experiment of a compact wideband 90 differential phase shifter / M. Sorn, R. Lech, J. Mazur // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No. 3. – pp. 494-501. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2175244.
37. Guo L. Phase shifters with wide range of phase and ultra-wideband performance using stub-loaded coupled structure / L. Guo, A. Abbosh // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2014. – Vol. 24, No. 3. – pp. 167-169. DOI: 10.1109/LMWC.2013.2293658.
38. Пільтяй С.І. Інтегрований хвилевідний фазозсувач на основі індуктивних штирів / С.І. Пільтяй, А.В. Булашенко // Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 82 –83.
39. Булашенко А.В. Мікрохвильовий фазозсувач із коефіцієнтом перекриття за частотою 3:1 / А.В. Булашенко, С.І. Пільтяй // Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 86 –87.
40. Пільтяй С.І. Широкопasmовий фазозсувач, навантажений закороченою лінією Т-подібної форми / С.І. Пільтяй, А.В. Булашенко // Матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції, м. Шостка, 23 квітня 2020 року. – Суми: Сумський державний університет, 2020. — С. 100 –101.
41. Булашенко А.В. Адаптивні цифрові антенні решітки / А. В. Булашенко // Науково-методична конференція викладачів, співробітників і студентів : тези доповідей, 23 квітня 2009 року / Відп. за вип. Т.М. Гричановська. - Суми : СумДУ, 2009. - Ч.1. - С. 44-45.
42. Пільтяй С. І. Поляризатори на основі квадратних хвилеводів із діафрагмами / С. І. Пільтяй, О.В. Биковський // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Радіоелектроніка в XXI столітті», Київ, Україна, 2020, с. 5–6.
43. Dubrovka F. F. Accuracy estimation of cross polar radiation prediction of open-ended thin-wall circular waveguide by approximate methods / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // Proceedings of 7-th Int. Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT\*09), June 9-12, Lviv, Ukraine, 2009.
44. Dubrovka F. F. Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides // F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // Radioelectronics and Communications Systems. — 2012. — Vol. 55, № 6. — P. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272712060015>.

**Цапков Сергій В'ячеславович** — студент групи РІ-71, радіотехнічного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, e-mail: [prostotsapkov@gmail.com](mailto:prostotsapkov@gmail.com);

**Демченко Іван Вольдемарович** — студент групи РА-61, радіотехнічного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, e-mail: [icegloom@gmail.com](mailto:icegloom@gmail.com);

**Булашенко Андрій Васильович** — ст. викл. кафедри теоретичних основ радіотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ;

**Пільтяй Степан Іванович** — к.т.н., доцент кафедри теоретичних основ радіотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

**Tsapkov Sergei V.** — Student of the Radio Engineering Faculty, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, e-mail: [prostotsapkov@gmail.com](mailto:prostotsapkov@gmail.com);

**Demchenko Ivan V.** — Department of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, e-mail: [icegloom@gmail.com](mailto:icegloom@gmail.com);

**Bulashenko Andrew V.** — senior lecture of the chair of theoretical foundations of radio engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;

**Piltyay Stepan I.** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv.