

УДК. 621.391

канд. техн. наук Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук Льїнов М. Д. ORCID: 0009-0008-6945-3354 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Хоменко П. В. ORCID: 0000-0002-8543-1971 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЇ КОЛІНЕАРНОЇ АНТЕНИ ПОСЛІДОВНОГО ТИПУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСПЕРСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПОВІЛЬНЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

У роботі представлена методика аналізу електричних характеристик колінеарних антен послідовного типу, виконаних за схемою Франкліна, які призначені для використання їх в системах радіозв'язку з рухомими об'єктами в якості базових, або абонентських антенно-фідерних пристроїв.

Колінеарні антени відносяться до антен всенаправленого типу і дозволяють суттєво збільшити коефіцієнт підсилення порівняно із вже існуючими антенами подібного типу, чим і приваблюють на сьогодні розробників антенної техніки.

Рішення електродинамічної задачі про розповсюдження радіохвиль у сповільнючій системі у вигляді спірального провідника знайшли відображення в багатьох наукових працях, як у строгій постановці задачі (із врахуванням явища дисперсії), так і у наближеній. Однак, громіздкий математичний апарат не зовсім прийнятний в інженерній практиці при розробці колінеарних антен послідовного типу. У роботі запропонована проста інженерна методика розрахунку параметрів індуктивного дроселя як фазозсувного приладу в колінеарній антені, заснована на строгій теорії для сповільнюючих систем, яка дозволяє достатньо легко розрахувати величину фазового зсуву в випромінюючих елементах антени.

Отримані результати моделювання електричних характеристик підтверджують ефективність запропонованої методики. Виявлено значний приріст коефіцієнта підсилення порівняно з існуючими типами антен та відповідність електричних характеристик заданим параметрам. Робота має важливий внесок у розвиток антенної техніки і практичне застосування в системах радіозв'язку з рухомими об'єктами. Запропонована методика розрахунку параметрів індуктивного дроселя може бути використана розробниками антен для підвищення продуктивності та ефективності їхньої системи радіозв'язку.

Ключові слова: радіолінія, колінеарна антена, антенна решітка, індуктивний дросель, сповільнююча система, фазозсувний пристрій, випромінюючий елемент.

H. Radzivilov, M. Ilyin, P. Khomenko *The method of calculating the design parameters of a collinear serial antenna using the dispersion characteristics of the retarding system.*

The paper presents a technique for analyzing the electrical characteristics of series-type collinear antennas made according to the Franklin scheme, which are intended for use in radio communication systems with moving objects as basic or subscriber antenna-feeder devices. Collinear antennas belong to omnidirectional type antennas and allow to significantly increase the amplification factor in comparison with already existing types of antennas of a similar type, which is what attracts antenna technology developers today.

The main element of a series-type collinear antenna is a phase-shifting device that determines both the performance of the antenna and its electrical characteristics. The most widely used phase-shifting devices were inductive chokes – a section of conductor of a certain length rolled into a spiral.

The proposed engineering method of calculating the parameters of the inductive choke allows you to quickly and accurately adjust its characteristics with the calculation of the necessary phase shift. This approach takes into account the physical parameters of the conductor material and the geometry of the spiral conductor, which greatly simplifies the engineering process of developing collinear antennas. The obtained results of simulation of electrical characteristics confirm the effectiveness of the proposed method.

A significant increase in the amplification factor compared to the existing types of antennas and compliance of the electrical characteristics with the specified parameters was revealed. The work has an important contribution to the development of antenna technology and has practical application in radio communication systems with moving objects. The proposed method of calculating the parameters of the inductive choke can be used by antenna developers to increase the productivity and efficiency of their radio communication system.

Keywords: radio line, collinear antenna, antenna array, inductive choke, deceleration system, phase-shift device, radiation device.

Постановка завдання. Одним із важливих елементів функціонування радіоліній систем зв'язку з рухомими об'єктами є антенно-фідерний пристрій, який забезпечує не тільки енергетичний потенціал радіолінії в будь-якому напрямку, але і визначає організаційно-технічну будову всієї системи радіозв'язку, надійність її роботи, розвідзахищеність, електромагнітну сумісність з іншими радіотехнічними пристроями. Тому питання, пов'язані з розробкою нових технічних рішень з компонування антенно-фідерних пристроїв, модернізації існуючих зразків, зменшення матеріальних затрат на їх виготовлення, актуальні і мають практичне значення на цей час при розборці нової техніки для телекомунікаційних систем.

На сьогодні у вказаних системах широко використовуються колінеарні антени. Одним з проблемних питань при розрахунку колінеарних антен є розрахунок індуктивностей, які виконують роль фазозсувального елемента (далі – ФЕ). Зазвичай такий розрахунок проводиться з використанням відомого трансцендентного рівняння. Але цей метод розрахунку є достатньо складним і дозволяє розрахувати ФЕ зі значними похибками. Тому виникає необхідність розрахунку параметрів ФЕ за допомогою дисперсійних характеристик уповільнюючої системи, що дозволить значно зменшити обчислювальне навантаження.

Науковим завданням статті є обґрунтування спрощеного методу розрахунку параметрів ФЕ, необхідних для покращення характеристик антенно-фідерних пристроїв та їх ефективного функціонування в системах зв'язку з рухомими об'єктами.

Аналіз останніх публікацій

У роботі [1] розглянуті шляхи підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку завдяки використанню адаптивних антенних решіток, що є основою подальших розробок та пошуків шляхів покращення характеристик радіоліній систем зв'язку з рухомими об'єктами.

Методика формування діаграми спрямованості кільцевої антенної решітки радіостанції мобільної радіомережі в умовах навмисних завад [2] дозволяє продовжити шлях проектування нових різновидів антенних решіток в різноманітних умовах, але потребує подальшої розробки методів їх ефективного застосування.

В роботах [3; 4] досліджено шляхи підвищення заводозахищеності мобільних радіомереж з використанням технології адаптивного діаграмоутворення та управління засобами заводозахисту військових систем радіозв'язку, що дозволить авторам шукати можливості підвищення ефективності застосування антен.

Робота [9] обґрунтовує ідею щодо уповільнюючих систем, що дає можливість для розробки нових методів проектування антен.

Однак ці роботи не враховують завдання щодо оптимізації розрахунку параметрів конструкції колінеарної антени послідовного типу з використанням дисперсійних характеристик уповільнюючої системи.

Метою даної роботи є представлення методу розрахунку конструкції колінеарної антени послідовного типу, виконаної за схемою Франкліна, з використанням дисперсійних характеристик уповільнюючої системи.

Виклад основного матеріалу.

Колінеарна антена послідовного типу являє собою лінійну синфазну антенну решітку, виконану з симетричних вібраторів різної довжини і конструкції. Основним елементом таких антен є ФЕ, який розташований між випромінюючими елементами колінеарної антени і призначений для їхнього синфазного живлення. Фактично ФЕ визначає як зовнішні, так і внутрішні характеристики антени в цілому та її працездатність.

У самому найпростішому варіанті ФЕ виконується у вигляді коротко замкнутого чверть-хвильового відрізка двопроводової лінії, як показано на рисунку 1.

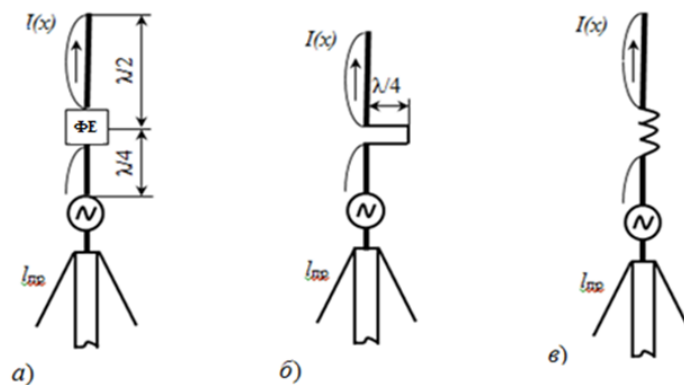


Рис. 1. Колінеарні антени послідовного типу:
а – загальна схема; б, в – реалізація ФЕ

Повна довжина короткозамкненого відрізка складає $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі. Відповідно, фаза струму змінюється на 180° , що забезпечує синфазне збудження другого елемента колінеарної антени. Перевага такого ФЕ – простота конструкції і простота її реалізації. Недолік – збільшення габаритних характеристик, що обмежує застосування таких антен на мобільних об'єктах. Цей недолік можливо деякою мірою усунути, якщо короткозамкнений відрізок двопровідної лінії звернути або розмістити вздовж випромінюючих елементів. На практиці найбільш широкое застосування отримали ФЕ, виконані у вигляді індуктивного дроселя (котушки індуктивності). Така реалізація ФЕ в колінеарних антенах послідовного типу забезпечує зменшення її масогабаритних характеристик антен, підвищує її механічну міцність, що особливо важливо при використанні таких антен на мобільних об'єктах. Варіант колінеарної антени з ФЕ у вигляді індуктивного дроселя представлений на рисунку 1, в.

Для вивчення принципу роботи ФЕ, виконаного у вигляді індуктивного дроселя, доцільно його уявити як спіральний хвилевід радіусом a , кутом намотування ψ і кроком спіралі s , як показано на рисунку 2.

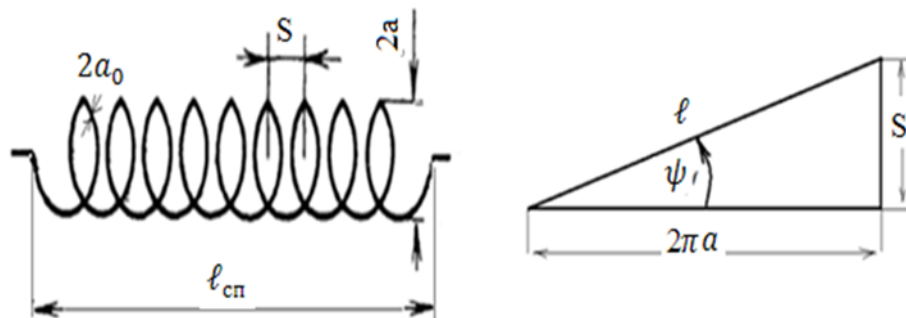


Рис. 2. Фазозсувний пристрій у вигляді індуктивного дроселя:
 $2a$ – діаметр спіралі; S – крок спіралі; ψ – кут намотування; $2a_0$ – діаметр дроту; $l_{\text{сп}}$ – довжина спіралі

Якщо припустити, що електромагнітна хвиля розповсюджується вздовж гвинтової лінії з фазовою швидкістю, то маємо вираз (1):

$$V_{\phi} = C, \quad (1)$$

де $C = 3 \times 10^8$ М/с – швидкість світла вздовж одного витка.

Хвиля розповсюджується за час Δt , вираз (2):

$$\Delta t = \frac{2\pi a}{c}. \quad (2)$$

За цей час хвиля зміщується вздовж осі Z на відстань S – крок спіралі. Позначивши швидкість розповсюдження хвилі вздовж спіралі як V_ϕ , отримаємо вираз (3):

$$\Delta t = \frac{S}{V_\phi}. \quad (3)$$

Отже, коефіцієнт сповільнення K_{co} буде дорівнювати (4):

$$K_{co} = \frac{c}{V_\phi} = \frac{\sqrt{(2\pi a)^2 - S^2}}{S} = \frac{2\pi a}{S} = \frac{1}{\sin\psi}, \quad (4)$$

за умови, що $S \ll 2\pi a$.

Із вище вказаного доцільно рекомендувати алгоритм розрахунку параметрів індуктивного дроселя у наступній послідовності.

Вихідними даними виступають: f – робоча частота; вимоги до геометричних розмірів індуктивного дроселя ($2a$ – діаметр спіралі; $l_{сп}$ – довжина котушки).

Спочатку визначаємось з Λ – довжиною хвиль у спіральному хвилеводі, вираз (5):

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{K_{co}}, \quad (5)$$

де λ_0 – довжина хвилі в вільному просторі; $K_{co} = 2\pi a/S$ – коефіцієнт сповільнення.

Для забезпечення зсуву фази хвилі в 180° довжина спіралі $l_{сп}$ повинна дорівнювати (6):

$$l_{сп} = \frac{\Lambda}{2} = \frac{\lambda_0}{2\pi a} \cdot S. \quad (6)$$

Кут натягу ψ і довжина проводу вираховується співвідношенням, вираз (7):

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{S}{2\pi a}; \quad l_{пр} = 2\pi a \cdot N, \quad (7)$$

де N – кількість витків спіралі.

Представлена методика розрахунку параметрів ФЕ у вигляді індуктивного дроселя називається методикою нульового наближення, оскільки K_{co} – коефіцієнт сповільнення, незалежний від частоти і електромагнітних хвиль, який не володіє дисперсійними властивостями, що не відповідає дійсності.

Більш вимоглива теорія аналізу спіральних хвилеводів показує, що нульовим наближенням можна користуватись (8), коли:

$$ka \operatorname{ctg} \psi \geq 3, \quad (8)$$

де $ka = 2\pi/\lambda_0$ – хвильове число.

На сьогодні відомо декілька строгих методів аналізу електромагнітного поля в сповільнених системах, виконаних у вигляді спіральних хвилеводів.

Перший з них це представлення спіральної структури у вигляді нескінченного тонкого циліндра радіусом a , що володіє ідеальною провідністю, тільки в напрямку витків спіралі.

У більш точному, але і більш складному методі, де враховується дискретність витків, розглядаються нескінченна тонка стрічкова спіраль з ідеальною провідністю.

Незалежно від використаного методу, кінцевий результат аналізу електромагнітного поля в сповільнених спіральних структурах з урахуванням дисперсії хвиль призводить до трансцендентного дисперсійного рівняння, яке має вид (9):

$$(ka \operatorname{ctg} \psi)^2 = (\gamma a)^2 \frac{I_0(\gamma a)K_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a)K_1(\gamma a)}, \quad (9)$$

де $I_0(\gamma a)$, $I_1(\gamma a)$ – модифіковані функції Беселя;

$K_0(\gamma a)$, $K_1(\gamma a)$ – функції Макдональда;

$\gamma^2 = \beta^2 - K^2$ – стала розповсюдження;

β – повздовжнє хвильове число.

При великих значеннях параметра γa для модифікованих функцій Беселя можна використовувати лише перші члени асимптотичних розкладань (10), (11):

$$I_m(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} l^x, \quad (10)$$

$$K_m(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} l^{-x}. \quad (11)$$

Тоді, дисперсійне рівняння (9) має прийнятний вигляд (12):

$$(ka \operatorname{ctg} \psi)^2 = (\gamma a)^2. \quad (12)$$

Підставивши значення $(\gamma a)^2$ з формули (11) в формулу (13)

$$(\beta a)^2 = (\gamma a)^2 + (Ra)^2, \quad (13)$$

отримаємо вираз (14) для K_{c0} – коефіцієнту сповільнення:

$$K_{c0} = \frac{\beta a}{Ra} = \frac{c}{V_{\phi}} = \sqrt{1 + \cot^2 \psi} = \frac{1}{\sin \psi}. \quad (14)$$

Це співвідношення справедливе при

$$ka \operatorname{ctg} \psi \geq 3 \quad (15)$$

та дає похибки обчислення K_{c0} приблизно 5÷10 %.

Ця методика щодо методики нульового наближення не враховує дисперсійних властивостей хвиль та передбачає, що хвиля розповсюджується виткам спіралі зі швидкістю світла.

Якщо в асимптотичних формулах розкладання недиференційних функцій Беселя обмежуються двома членами рядка, то дисперсійне рівняння приймає вигляд (16):

$$(Ra \operatorname{ctg} \psi)^2 = (\gamma a)^2 \left[1 + \frac{1}{2(\gamma a)^2} \right]. \quad (16)$$

Тоді K_{c1} – коефіцієнт сповільнення в першому наближенні буде визначатись наступним виразом (17):

$$K_{c1} = \frac{\beta a}{Ra} = \frac{1}{\sin \psi} \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \psi}{2(K_u)^2}}. \quad (17)$$

Цією формулою можна користуватись вже до значень (18):

$$\gamma a \geq 0,5 \text{ або } Ra \operatorname{ctg} \psi \geq 0,5. \quad (18)$$

У цьому випадку похибка розрахунку складає 5 %, що цілком допустимо для інженерної практики.

На рисунку 3 представлені графіки залежності коефіцієнта сповільнення K_c від конструктивних розмірів індуктивного дроселя, що виконує роль фазозсувного пристрою з колінеарною антеною послідовного типу. Результати розрахунку наглядно демонструють дисперсійну область роботи індуктивного дроселя, де недоцільно приймати формули нульового і першого наближення для розрахунку коефіцієнта сповільнення.

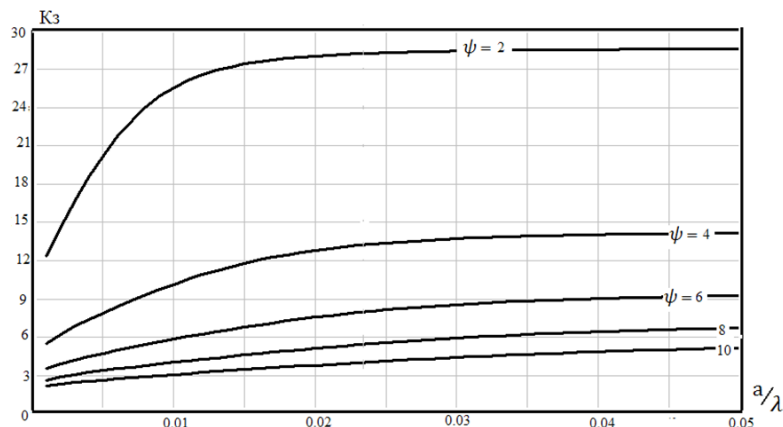


Рис. 3. Залежність коефіцієнта сповільнення K_c від конструктивних розмірів індуктивного дроселя

В якості демонстрації викладених методик з розрахунку котушки індуктивності як основного елемента колінеарної антени проведемо розрахунок її основних електричних параметрів і зробимо висновок про межу використання.

За вихідні дані маємо: $f = 915$ МГц – робоча частота ($\lambda = 32,78$ – довжина хвилі); $2a_0 = 1$ мм – діаметр провідника.

Нехай діаметр котушки $2a = 8$ мм; $a/\lambda = 0,012$, а кут обмотки $\psi = 4,6^\circ$. У цьому випадку теорія нульового наближення за розрахунком K_c дає наступні результати: $K_{c0} = 12,6$; $N_0 = 6,5$; $L_{\text{про}} = 164$ мм.

Теорія першого наближення: $K_{c1} = 8,6$; $N_1 = 9,5$; $L_{\text{при}} = 240$ мм.

Строга теорія: $K_c = 9$; $N = 9,1$; $L_{\text{пр}} = 230$ мм.

При збільшенні розмірів індуктивної котушки в 2,5 рази:

$2a = 18$ мм; $a/\lambda = 0,03$; $\psi = 2^\circ$; $K_a \cot \psi = 4,5$.

Отримуємо:

$$K_{c0} = 28; N_0 = 3; L_{\text{пр}} = 164;$$

$$K_{c1} = 28; N_1 = 3; L_{\text{пр}} = 166;$$

$$K_c = 28; N = 3; L_{\text{пр}} = 164.$$

Отримані результати дозволяють зробити важливий практичний висновок: за умови $ka \operatorname{ctg} \psi > 3$ (відсутність дисперсії в котушці індуктивності), довжина дроту $L_{\text{прд}}$ вибирається рівною $\lambda/2$, для конкретного кута нахилу спіралі ψ . На рисунку 4 показано межі використання методики нульового наближення з розрахунків коефіцієнта сповільнення в фазозсувному пристрої, який виконано в вигляді індуктивної котушки.

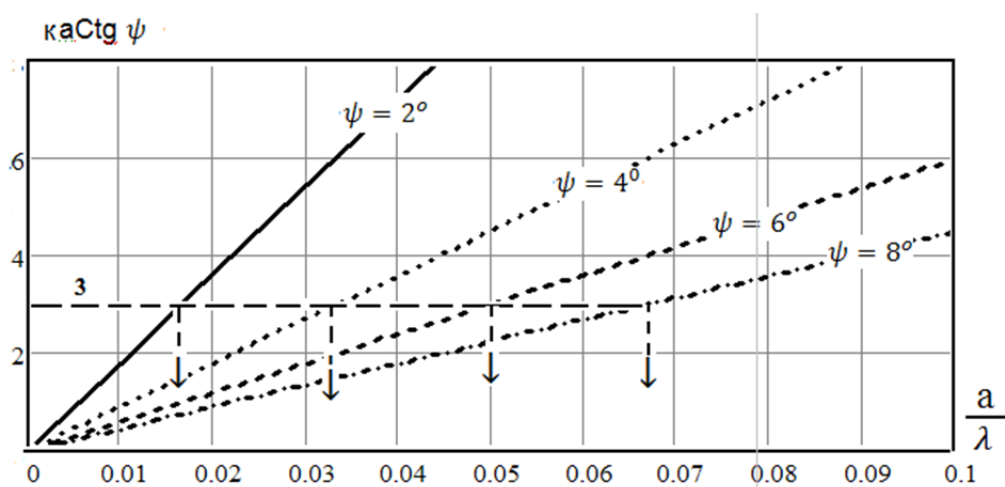


Рис. 4. Графік вибору методики до розрахунку K_c – коефіцієнта сповільнення

Висновки. Таким чином, запропонований алгоритм розрахунку коефіцієнта сповільнення в індуктивній котушці, яка виконує функцію фазозсувного пристрою, дозволяє достатньо просто спроектувати і розрахувати параметри колінеарної антени послідовного типу, виконаної в симетричних або несиметричних варіантах.

Потенційні області застосування цих досліджень містять розробку та оптимізацію базових і абонентських антенно-фідерних пристроїв у системах мобільного зв'язку, де більшість факторів є низьким рівнем завантаження сигналу та високою якістю зв'язку. Дослідження можуть знайти застосування в секторах транспорту, військовій техніці та інших галузях, де потрібна ефективна комунікація з рухомими об'єктами. Загальні результати цієї роботи вказують на важливість і перспективи використання колінеарних антен системного типу в системах радіозв'язку.

Отримані наукові результати мають практичне значення для інженерів та розробників, які використовують проектування та оптимізацію бездротових комунікаційних систем.

Напрямок подальших досліджень є розрахунок більш складних конфігурацій колінеарних антен та дослідження їх взаємодії з іншими компонентами системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борисов І. В., Гурський Т. Г., Ільїнов М. Д., Гриценюк К. М. Підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку за рахунок використання адаптивних антенних решіток // Збірник наукових праць ВІПІ. 2015. № 1. С. 16–24.
2. Гриценюк К. М., Гурський Т. Г. Методика формування діаграми спрямованості кільцевої антенної решітки радіостанції мобільної радіомережі в умовах навмисних завад // Збірник наукових праць ВІПІ. 2018. № 3. С. 6–16.
3. Боголій С. М., Гурський Т. Г., Макаруч В. І., Хижий О. І. Підвищення заводозахисності мобільних радіомереж з використанням технології адаптивного діаграмоутворення // Збірник наукових праць ВІПІ. 2022. № 2 (2). С. 5–14.
4. Кувшинов О. В. Адаптивне управління засобами заводозахисту військових систем радіозв'язку // Збірник наукових праць ВІКНУ. 2009. Вип. 17. С. 125–130.
5. Davies D.E.N., Rizk M.S.A.S. A broadband experimental null-steering antenna system for mobile communications. Proc/ IERE? 1978, Vol. 48, № 10.
6. Davies D.E.N., Rizk M.S.A.S. A small radius circular array antenna with 3600 null-steering capability/ - Int/ Conf/ Antennas and Propag., London, 1978, p. 60–64.
7. Rahim T., Guy J.R.F., Davies D.E.N. A wideband UHF circular array. Proceeding of IEE Antennas and Propagation Conference, York, 1981, 13–16 April.
8. Ломан В. И., Нестеренко И. К. Поляризационный компенсатор помех // Известия вузов. Радиоэлектроника. Том 28. № 3. 1985. С. 59–61.
9. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы // Советское радио. 1968. С. 248–301.
10. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ // Высшая школа. Том 1 «Техника сверхвысоких частот». 1970. С. 196–224.