

Капличний О.С.

<https://orcid.org/0009-0001-7464-4517>

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ КОМУТАТОРА З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВІД'ЄМНОГО АКТИВНОГО ОПОРУ

У роботі досліджено надвисокочастотні (НВЧ) комутатори та ключові елементи на основі транзисторних схем з від'ємним диференційним опором із використанням *S*-негатронів *N*-типу. Актуальність зумовлена потребою створення широкосмугових, малогабаритних і енергоефективних комутаційних пристроїв із малими втратами та високою ізоляцією для телекомунікаційних і радіотехнічних систем.

Проаналізовано обмеження традиційних НВЧ комутаторів на феритах, *p*-*i*-*n* діодах і транзисторах, зокрема значні втрати або вузьку смугу частот. Показано, що використання елементів з від'ємними диференційними параметрами дає змогу компенсувати активні втрати, формувати малі значення вносимого затухання у відкритому режимі та забезпечувати значну ізоляцію в закритому стані.

Розглянуто схеми з послідовним і паралельним включенням *S*-негатрона *N*-типу. Побудовано еквівалентні моделі та отримано аналітичні вирази для коефіцієнта передачі з урахуванням від'ємної диференційної смності та активного опору. Досліджено частотні характеристики в діапазоні 100 – 1000 МГц.

Для послідовної схеми встановлено невелике затухання у відкритому режимі та значне затухання у закритому режимі. Запропоновано компенсацію від'ємного активного опору шляхом введення додатного опору, що забезпечує широкосмуговість і стабільні вихідні характеристики. Для паралельної схеми показано можливість отримання підсилення у відкритому режимі та визначено умови стійкості за критерієм Рауса – Гурвіца.

Результати роботи підтверджують доцільність використання транзисторних схем з від'ємним диференційним опором для побудови широкосмугових НВЧ комутаторів із керованими характеристиками, малими втратами, можливістю підсилення та інтегральної реалізації. Отримані аналітичні залежності можуть бути використані при синтезі активних комутаційних і фільтруючих пристроїв у системах телекомунікацій та радіотехніки.

Ключові слова: НВЧ комутатор, від'ємний диференційний опір, широкосмуговий ключ, активний опір, транзисторні схеми, негатроніка.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток телекомунікаційних систем із імпульсним представленням інформації та використанням фазо-логічних і нейронних елементів зумовлює потребу у створенні радіотехнічних пристроїв з керованими, нелінійними та адаптивними характеристиками. У таких структурах особливого значення набувають НВЧ комутаційні вузли, здатні працювати в умовах високочастотної обробки імпульсних сигналів із мінімальними втратами та забезпеченням стійкості. Існуючі комутатори не повною мірою відповідають вимогам інтеграції з фазо-логічними та нейронними схемами через обмежену широкосмуговість і складність керування параметрами. Тому актуальною є розробка активних НВЧ пристроїв на основі елементів з від'ємними диференційними параметрами, які можуть бути використані

як функціональні вузли в радіотехнічних і телекомунікаційних системах із імпульсним представленням інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях радіотехнічних пристроїв із імпульсним представленням інформації значна увага приділяється фазо-логічним і нейронним елементам, здатним реалізовувати нелінійну обробку сигналів у НВЧ діапазоні. Відомі роботи з негатроніки та елементів з від'ємними диференційними параметрами демонструють можливість формування активних вузлів із керованими амплітудно-частотними характеристиками, що є релевантним для побудови імпульсних логічних структур. Окремі дослідження присвячені НВЧ ключам і комутаторам на транзисторній основі, однак вони переважно не орієнтовані на інтеграцію з фазо-логіч-



ними та нейронними схемами. Невирішеними залишаються питання широкосмуговості, стійкості та узгодження параметрів активних НВЧ елементів із вимогами імпульсних телекомунікаційних систем нового покоління.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення, теоретичне обґрунтування та дослідження НВЧ комутаторів і ключових елементів на основі транзисторних схем з від’ємним диференціальним опором, зокрема із застосуванням С-негатронів N-типу, з метою отримання широкосмугових характеристик, високої ізоляції у режимі «закрито» та малих втрат або підсилення у режимі «відкрито».

Виклад основного матеріалу. У високо-частотних системах комутації сигналів перевагу мають ключі з малими втратами в режимі «відкрито» та високим затуханням у режимі «закрито». Застосування транзисторних схем із від’ємним диференціальним опором (ВДО) – зокрема С-негатронів N-типу – дозволяє створювати НВЧ-комутатори з нульовими втратами у відкритому стані та додатковим підсиленням сигналу. [1-2] Відомо, що ключі на НВЧ-транзисторах у резонансному режимі забезпечують найкращі параметри відкриття/закриття. [3] Використання С-негатронів N-типу імітує ці переваги: ключі мають малі втрати, компактні габарити, низьку потужність керування та можливість інтеграції, а їх принциповою перевагою є широкосмуговість. Така властивість критична для імпульсних систем, оскільки забезпечує мінімальне спотворення коротких сигналів.

Для переходу до імпульсно-фазових логічних та нейронних структур необхідні ключі з широким частотним діапазоном, керованістю від керуючого імпульсу та високою швидкістю. У цьому контексті досліджено комутатори на основі каскадних схем з С-негатронами, які забезпечують електричне керування переключенням сигналу з послідовним або паралельним включенням ВДО-елемента. [3] У огляді розглянуто принцип побудови та аналіз характеристик таких ключів, наведено приклади схем і графіків, а також продемонстровано результати моделювання конкретних НВЧ-комутаторів. Особливу увагу приділено зв’язку отриманих результатів із застосуванням у імпульсних фазі-логічних та нейронних структурах – зокрема вимогам керованості, широкосмуговості, стійкості і топологічної придатності. [5]

Основний елемент комутатора – аналоговий ключ. У розглянутій схемі ключ реалізовано на

основі послідовного включення транзисторної структури з кулон-вольтовою характеристикою N-типу С-негатрона. [6] При цьому в одному режимі ключ забезпечує малі втрати у тракці сигналу, а в іншому – велике затухання.

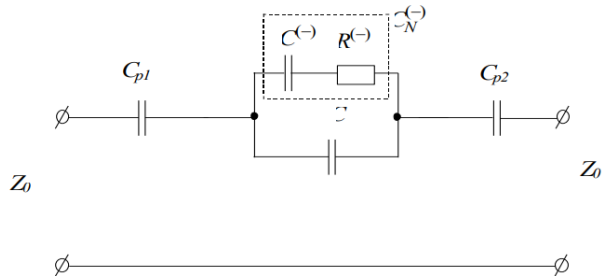


Рис. 1. Еквівалентна схема ключа на С – негатроні N-типу з урахуванням еквівалентної схеми С – негатрона N – типу в режимі “закрито”: $C^{(-)}$ – від’ємний диференціальний опір С-негатрона, $R^{(-)}$ – від’ємний активний опір С-негатрона, Z_0 – характеристичний опір лінії, C_{p1}, C_{p2} – розділові ємності

На рис.1 наведено еквівалентну схему такого ключа. В неї входить ВДО-елемент (С-негатрон) із від’ємною диференційною ємністю (-C) та активним опором (-R), а також розділові ємності та характеристичний опір лінії.

У режимі «відкрито» робоча точка С-негатрона лежить на спадній ділянці його кулон-вольтової характеристики, де $\Delta C > 0$. Звідси повний комплексний опір керуючого елемента в закритому режимі наведений на рис. 2.

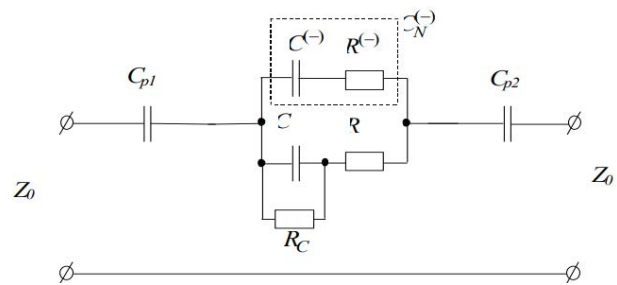


Рис. 2. Еквівалентна схема ключа на С-негатроні N-типу в режимі “закрито” з компенсуючим опором R : $C^{(-)}$ – від’ємний диференціальний опір С-негатрона, $R^{(-)}$ – від’ємний активний опір С-негатрона, Z_0 – характеристичний опір лінії, C_{p1}, C_{p2} – розділові ємності, R_C – активний опір втрат конденсатора з ємністю C

Підстановка цього опору у вираз для затухання дає аналітичну залежність $L(f)$ у відкритому режимі формула (1). При «закритому» режимі, навпаки, $\Delta C < 0$ і опір стає індуктивним. [7]

$$L_{\omega} = 10 \lg \left(\frac{1 + \omega^2 (C^2 R^2 + 4C^2 R Z_0 + 4((C + C_{d1})^2 + C^2 C_{d1}^2 R^2 \omega^2) Z_0^2)}{4\omega^2 ((C + C_{d1})^2 + C^2 C_{d1}^2 R^2 \omega^2) Z_0^2} \right) \quad (1)$$

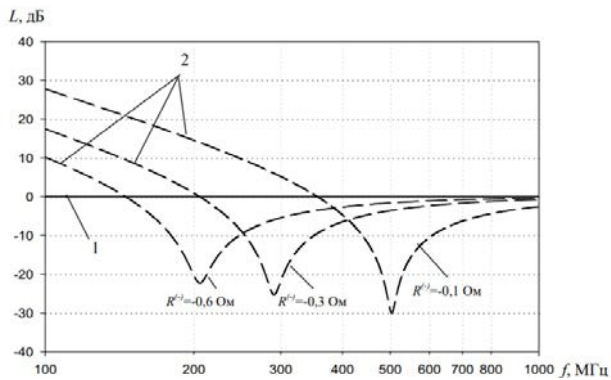


Рис. 3. Частотна залежність затухання L , утвореного ключем в режимі «відкрито» (1) і «закрито» (2) для трьох значень від’ємного активного опору $R^{(-)}$

На рис. 3 показані приклади частотних характеристик затухання $L(f)$ в обох режимах ключа для різних значень параметрів від’ємного диференційного опору. Тут крива 1 відповідає режиму «відкрито», крива 2 – «закрито» (вираженої активним затуханням $R^{(-)}$). Згідно з рис.3, при «відкрито» затухання майже не залежить від частоти у розглянутому діапазоні, тоді як при «закрито» $L(f)$ відрізняється значним затуханням, котре залежить від величини від’ємного R . Наприклад, при збільшенні $|R|$ з $0,1 \Omega$ до $0,6 \Omega$ межа затухання зростає. [7] Таким чином, ключ у закритому стані фактично є «резонансним поглиначем», а в відкритому – майже прозорим.

Крім того, через наявність від’ємного опору ключ може надавати підсилення. Аналітичний розрахунок показує, що за певних умов від’ємного опору і ємності ключ починає працювати з коефіцієнтом підсилення ($L < 0$) у відкритому стані. Це підтверджено моделлю (рис.4): при зменшенні абсолютної величини $|R|$ (наприклад, від -100Ω до -30Ω) затухання у відкритому режимі зростає, тобто зменшується від’ємне

значення L , що еквівалентно збільшенню підсилення ключа – з ≈ -2.5 дБ до -15.5 дБ.

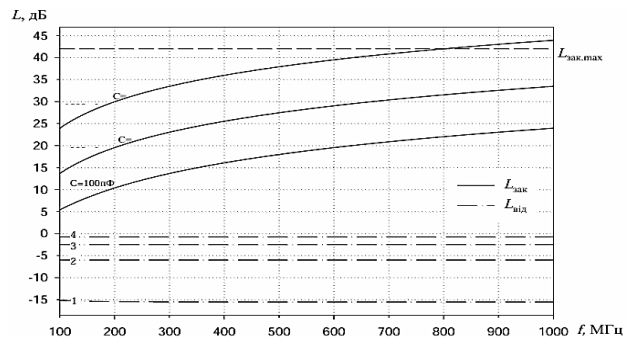


Рис. 4. Частотна залежність затухання L , утвореного ключем в режимі «закрито» $L_{зак}$ і «відкрито» $L_{від}$: 1 – (–) $R = -30 \Omega$, 2 – (–) $R = -50 \Omega$, 3 – (–) $R = -100 \Omega$, 4 – (–), $R = -300 \Omega$

Отже, послідовно увімкнений С-негатрон може слугувати імпульсним підсилювачем або ключем, що є важливим для нейроморфних схем.

Альтернативна топологія – ключ із паралельним включенням керуючого елемента з ВДО у тракт сигналу. На рис. 5 наведено еквівалентні схеми такого ключа: (а) – у режимі «відкрито», (б) – «закрито».

У цій схемі активний елемент з від’ємним диференціальним опором підключено паралельно лінії передачі. При «відкрито» точка нульової напруги зміщення лежить на падаючій ділянці кулон-вольтової характеристики, тому $\Delta C < 0$, а при «закрито» – навпаки.

Графіки частотної залежності затухання $L(f)$ для цього ключа наведені на рис.4. Кожен графік відповідає різним значенням ΔC через зміну напруги зміщення. З аналізу видно, що зростання ΔC , тобто підсилення об’ємної ємності, збільшує максимальне затухання у «закритому» стані, наприклад, при ΔC від 300 пФ до 1000 пФ L_{max}

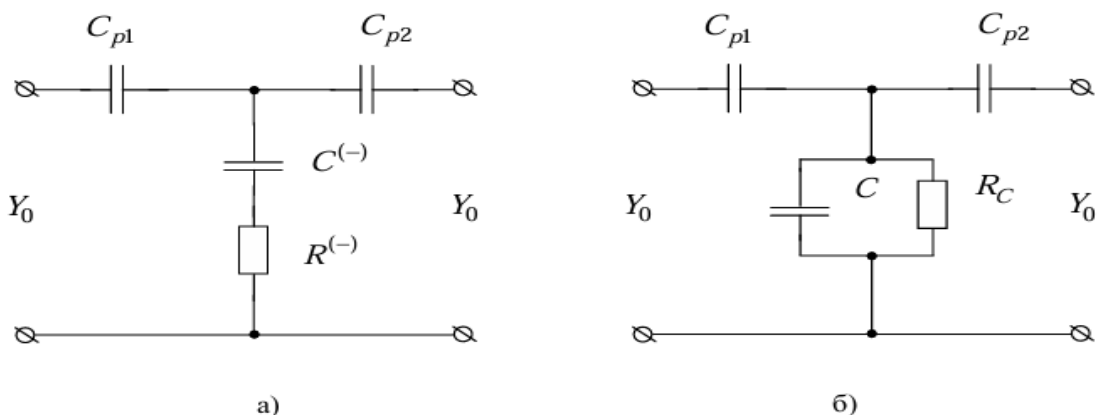


Рис. 5. Еквівалентна схема ключа з паралельним включенням С-негатрона N-типу в режимі «відкрито» (а) та «закрито» (б)

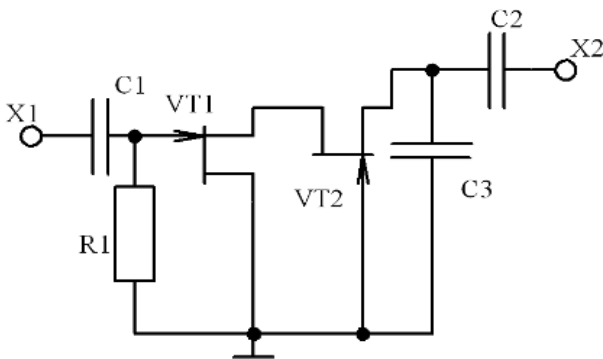


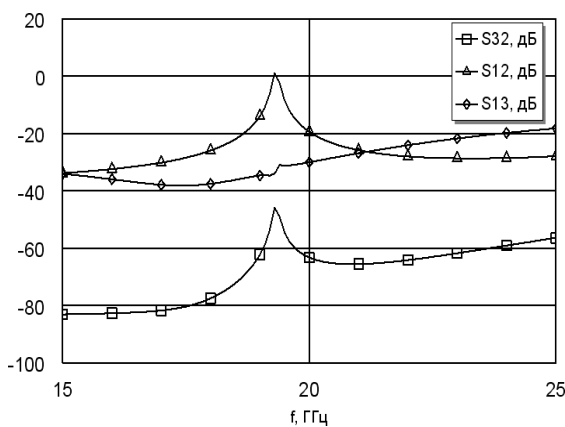
Рис. 6. Схема (кола живлення не показані) не взаємного однорезонаторного НВЧ комутатора

зростає з 26.5 дБ до 37 дБ на частоті 450 МГц. Водночас, від’ємна активна провідність при відкритому режимі забезпечує підсилення: за формулою (2) видно, що за умови певного співвідношення параметрів $0 < L$ відкрито, тобто досягається підсилення сигналу. [9]

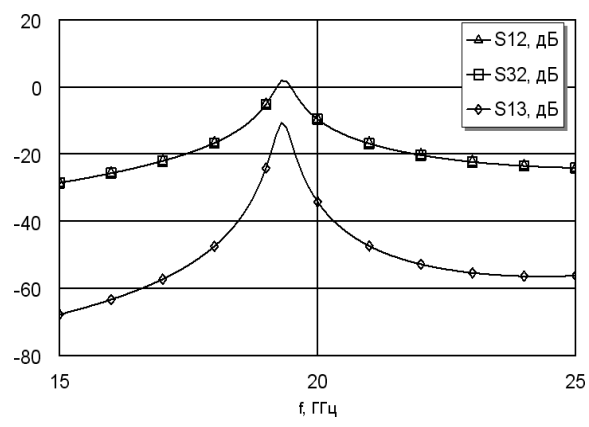
$$L_{\text{від}} = 10 \lg \left(\frac{\left(4Y_0^2 + C^{(-)2} (\omega + 2R_0^{(-)} \omega Y_0)^2 \right)}{4 \left(1 + C^{(-)2} R^{(-)2} \omega^2 \right) Y_0^2} \right) \quad (2)$$

Ключ із паралельним ВДО має схожі властивості управління сигналом, але відрізняється своєю топологією й дозволяє отримати додаткові режими як от імпульсний атенуатор з керованим затуханням. При цьому для збереження стабільності слід підбирати додаткові резистивні компоненти або компенсуючий опір, щоб уникнути неконтрольованого самозбудження.

Для практичної перевірки запропонованих ідей побудовано та змодельовано конкретні НВЧ-комутатори.



а)



б)

Рис. 7. Коефіцієнт передачі по напрузі

Як приклад, на рис.6 показано однорезонаторну не взаємну активну НВЧ-схему (двоканальний комутатор), де використовуються транзистори та паразитні ємності як елементи з ВДО, а також резонансний контур на виході яка складається з індуктивності на основі ПШТ та резонуючої ємності С3, що утворює паралельний коливальний контур, включений паралельно вихідному колу, що забезпечує частотну вибірковість сигналу. [10]

Вхідний сигнал, через розділові конденсатори С1 і С2 подається між затвором і витком ПТШ, що забезпечує не взаємні властивості фільтра.

Результати моделювання схеми не взаємного однорезонаторного НВЧ комутатора свідчать, що вона забезпечує підсилення ~ 3 дБ на частоті 17.1 ГГц у смузі пропускання. За межами смуги передбачено загасання понад 20 дБ і розв’язку каналів ≈ 10 дБ. Ці характеристики свідчать про високу селективність і достатню ізоляцію комутатора, що важливо для імпульсної передачі даних, якщо врахувати, що швидкі імпульси мають широкий спектр і потребують узгоджених фільтрів для запобігання спотворень. [11]

Коефіцієнт передачі напруги показаний на рис.7, а блокова схема двоканального комутатора – на рис.8.

Висновки. У результаті досліджень встановлено, що транзисторні структури з від’ємними диференційними параметрами можуть бути використані як функціональна основа радіотехнічних пристроїв із імпульсним представленням інформації, зокрема у фазо-логічних та нейронних НВЧ схемах. Для послідовного включення С-негатрона N-типу підтверджено можливість отримання дуже малого затухання у режимі передачі та значної ізоляції у режимі блокування, а введення компенсуючого додатного опору забезпечує широкосмуговість і стабільність характеристик. Для пара-



Рис. 8. Блок схема НВЧ – комутатора на два канали

лельної схеми показано можливість формування підсилення у відкритому стані та визначено умови стійкості за критерієм Рауса–Гурвіца. Отримано затухання у вимкненому стані до 42 дБ і незначне підсилення у ввімкненому стані при інтегральній реалізації з площею кристала 2 мм². Результати підтверджують придатність таких активних НВЧ елементів для використання у телекомунікаційних системах із фазологічною та нейронною обробкою імпульсних сигналів.

Список літератури:

1. Філінюк М.А., Кравцов Ю.І. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький, 2002. №1.
2. Філінюк М.А. Вісник ВПІ. Вінниця, 2002. №6.
3. Aghaei, Maryam & Bogaerts, Annemie. (2015). Particle transport through an inductively coupled plasma torch: Elemental droplet evaporation. *J. Anal. At. Spectrom.* DOI: 31. 10.1039/C5JA00162E.
4. L. Siqing, L. Canfeng, and L. Qiwei, “Magnetic-field concentration in inductively coupled plasma reactors,” 2006, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a1/f5/bc/2ec53087e0204a/WO2006044419A2.pdf>.
5. Yan, Keping & Heesch, E.J.M. & Pemen, A. & Huijbrechts, P. & Laan, Piet. (2001). A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation. *Review of Scientific Instruments*. 72. 2443-2447. DOI: 10.1063/1.1367358.
6. Narayanaswamy, Venkateswaran & Raja, Laxminarayan & Clemens, Noel. (2010). Characterization of a High-Frequency Pulsed-Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control. *Aiaa Journal - AIAA J*. 48. 297-305. 10.2514/1.41352.
7. Авторське свідоцтво SU 765900, H01H 33/66, 23.09.80
8. F. Volke and M. Benecke, “NMR imaging method and device focusing magnetic flux to a focal point in the imaging volume region,” 2009, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/16/37/87/975495e3626e18/US7518361.pdf>.
9. J. K. Hastings, M. A. Juds, and M. S. G., “Magnetic flux concentrator anti-differential current sensing topology,” 2007, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/82/d4/32/914581cbb0def7/US7157898.pdf>.
10. O. Yoshida, T. Maruyama, and K. Shirakubo, “Torque sensor and power steering system using the torque sensor,” 2016, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/81/94/f5/c77bd565becc0c/US9302700.pdf>.
11. P. Augier, E. Coupart, A. Eydelie, P. Gauthier, C. G.-M. Guillo, and Tl. Jadeau, “Rotating electrical machine with concentration flux rotor and teeth-wound stator,” 2001, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8b/b0/67/9d143afac2006e/EP1152516A2.pdf>.
12. Lugin, V & Koptyakov, Alexander & Petrov, A & Zinovev, K & Kamaev, D. (2018). Power supplies for dual-frequency induction melting of metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 313. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012008.
13. K. Tashiro, G.-ya Hattori, and H. Wakiwaka, “Magnetic flux concentration methods for magnetic energy harvesting module,” in *EPJ Web of Conferences*, 2013, p. 4, DOI: 10.1051/epjconf/20134006011.
14. Prat-Camps, Jordi & Navau, Carles & Sanchez, Alvaro. (2013). Experimental realization of magnetic energy concentration and transmission at a distance by metamaterials. *Applied Physics Letters*. DOI: 105. 10.1063/1.4903867

Kaplychnyi O.S. RESEARCH OF A MICROWAVE SWITCH WITH NEGATIVE RESISTANCE COMPENSATION

The work investigates ultra-high-frequency (MHF) switches and key elements based on transistor circuits with negative differential resistance using N-type C-negatrons. The relevance is due to the need to create broadband, small-sized and energy-efficient switching devices with low losses and high isolation for telecommunication and radio engineering systems.

The limitations of traditional microwave switches based on ferrites, p-i-n diodes and transistors are analyzed, in particular significant losses or a narrow frequency band. It is shown that the use of elements with negative differential parameters makes it possible to compensate for active losses, form small values of insertion attenuation in the open mode and provide significant isolation in the closed state.

Circuits with serial and parallel inclusion of an N-type C-negatron are considered. Equivalent models were constructed and analytical expressions for the transfer coefficient were obtained taking into account negative differential capacitance and active resistance. Frequency characteristics were studied in the range of 100 – 1000 MHz.

For the serial circuit, a small attenuation in the “open” mode and a significant attenuation in the “closed” mode were established. Compensation of the negative active resistance was proposed by introducing a positive resistance, which ensures broadband and stability of the characteristics. For the parallel circuit, the possibility of obtaining amplification in the open mode was shown and the stability conditions were determined according to the Routh – Hurwitz criterion.

The results of the work confirm the feasibility of using transistor circuits with negative differential resistance for constructing broadband microwave switches with controllable characteristics, low losses, the possibility of amplification and integrated implementation. The obtained analytical dependencies can be used in the synthesis of active switching and filtering devices in telecommunications and radio engineering systems.

Keywords: *microwave switch, negative differential resistance, broadband switch, active resistance, transistor circuits, negatronics.*

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026