

УДК 621.38

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/10>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Ліхашорський С.В.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ В АКТИВНИХ НВЧ ФІЛЬТРІВ І МЕТОДИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ

Активні мікрохвильові фільтри відіграють вирішальну роль у сучасних системах зв'язку, але забезпечення їх динамічної стабільності за змінних рівнів потужності сигналу залишається проблемою. У статті досліджено динамічні характеристики активних мікрохвильових фільтрів і запропоновано методи їх стабілізації. Визначено ключові вимоги до цих фільтрів, включаючи динамічний діапазон рівнів потужності вхідного сигналу 20 дБ, рівномірність смуги пропускання та мінімальний коефіцієнт передачі за межами смуги пропускання. Обговорюються різні методології тестування, підкреслюючи необхідність точності та чутливості через малу смугу пропускання фільтра та широкий діапазон рівнів вхідної потужності.

У статті представлено три схеми вимірювання з акцентом на усуненні їх обмежень. Щоб подолати ці проблеми, представлено новий підхід, що використовує перехідні явища в транзисторах. Цей підхід включає пасивні схеми, які забезпечують негативний зворотний зв'язок по струму, ефективно стабілізуючи параметри фільтра у відповідь на зміни вхідної потужності.

Експериментальні результати демонструють ефективність ланцюгів динамічної стабілізації для підтримки продуктивності фільтра в межах заданих допусків. Стаття завершується обговоренням конструкції багатоканального селективного блоку на основі принципу динамічної стабілізації, підкреслюючи його потенціал для високоселективних конструкцій фільтрів із низькими втратами.

Це дослідження пропонує цінну інформацію про динамічну поведінку активних мікрохвильових фільтрів і пропонує практичні рішення для підвищення їх стабільності, що робить їх більш надійними компонентами в сучасних системах зв'язку. Звертаючись до складнощів динамічної нестабільності, ця робота сприяє вдосконаленню технології мікрохвильових фільтрів, уможливаючи продовження еволюції бездротового зв'язку та радіолокаційних систем із покращеною продуктивністю та надійністю.

Ключові слова: мікрохвильові фільтри, НВЧ фільтри, динамічна стабільність, рівні потужності сигналу, транзисторна стабілізація, системи зв'язку.

Постановка проблеми. Активні мікрохвильові фільтри є основним компонентом різноманітних систем зв'язку та радіолокації, забезпечуючи необхідну частотну вибірковість для забезпечення цілісності сигналу та оптимальної продуктивності. Ці системи мають важливе значення для різноманітних застосувань: від бездротового зв'язку до дистанційного зондування тощо. Ефективність і надійність цих систем значною мірою залежать від динамічної стабільності активних мікрохвильових фільтрів, які в них використовуються.

Основна проблема, розглянута в цій статті, стосується динамічної нестабільності, яку демонструють активні мікрохвильові фільтри під впливом змінних рівнів потужності сигналу. Це питання створює серйозну проблему при проектуванні та впровадженні сучасних систем зв'язку.

Гарантія того, що ці фільтри можуть підтримувати свої задані характеристики продуктивності в широкому діапазоні рівнів потужності вхідного сигналу, має вирішальне значення для задоволення вимог сучасних комунікаційних і радіолокаційних технологій.

У своїй основі ця проблема переплітається з такими науково-практичними завданнями:

Підвищення стійкості системи: динамічна нестабільність активних мікрохвильових фільтрів може призвести до погіршення продуктивності та спотворення сигналу в системах зв'язку та радарів. Вирішуючи цю проблему, ми прагнемо підвищити стійкість цих систем, забезпечуючи послідовну та надійну роботу навіть за різних умов сигналу.

Оптимізація конструкції фільтра: розробка методів динамічної стабілізації не тільки вирішує миттєві проблеми, але й дозволяє розробляти

більш ефективні та компактні активні мікрохвильові фільтри. Ця оптимізація має вирішальне значення для зниження системних витрат і споживання енергії.

Розвиток комунікаційних технологій: у сучасному світі надійний і високошвидкісний зв'язок має першочергове значення. Вирішення проблеми динамічної нестабільності активних мікрохвильових фільтрів сприяє розвитку комунікаційних технологій, підтримці розвитку бездротових мереж, передачі даних та інших критичних програм.

Можливість точного зондування: Радар і системи дистанційного зондування покладаються на точну обробку сигналу. Динамічна нестабільність у фільтрах може поставити під загрозу точність цих систем. Вирішення цієї проблеми забезпечує точність і надійність датчиків у таких сферах, як метеорологія, моніторинг навколишнього середовища та оборона.

Відповідність галузевим стандартам: багато галузей мають суворі стандарти для систем зв'язку та радіолокаційних систем, зокрема щодо якості та стабільності сигналу. Вирішення проблеми динамічної нестабільності узгоджується з метою відповідності галузевим стандартам і правилам.

Підводячи підсумок, можна сказати, що динамічна стабільність активних мікрохвильових фільтрів є ключовою проблемою, що має далекосяжні наслідки як для наукових досліджень, так і для практичних застосувань. Вивчаючи це питання та пропонуючи інноваційні методи стабілізації, ми сприяємо розвитку технологій, які лежать в основі сучасних комунікаційних, зондових і радіолокаційних систем, зрештою формуючи спосіб підключення та взаємодії в нашому все більш взаємопов'язаному світі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері активних мікрохвильових фільтрів та їх динамічної стабільності останні дослідження та публікації пролили світло на виклики та інновації в цій важливій галузі. Цей аналіз дає уявлення про поточний стан наукової думки, висвітлюючи ключові висновки та нові тенденції, на яких базується наш підхід у цій статті.

Динамічна стабільність і обробка сигналів:

Останні дослідження [1–4] підкреслили ключову роль динамічної стабільності в обробці сигналів, особливо в контексті систем зв'язку та радіолокації. Досліди виявили вплив динамічної нестабільності на якість сигналу, частоту помилок і загальну продуктивність системи. Отримані дані свідчать про сильну кореляцію між стабільністю фільтра та ефективністю обробки сигналу.

У монографії [3] підкреслюється критична роль функціональних вузлів у радіовимірювальних пристроях та їх потенціал для покращення продуктивності. Незважаючи на те, що стаття в основному стосується функціональних вузлів у радіовимірювальних пристроях, її принципи, методології та підходи відіграють значущу роль у розвитку активних мікрохвильових фільтрів. Впроваджуючи економічно ефективні інновації, аналізуючи вимоги та узгоджуючи характеристики з потребами застосування, розробники активних мікрохвильових фільтрів можуть підвищити продуктивність і економічну ефективність цих критичних компонентів у сучасних системах зв'язку та радіолокації.

Помітною тенденцією в останніх дослідженнях [2, 4] є використання перехідних процесів у транзисторах для динамічної стабілізації. Цей підхід, представлений у нашій статті, привернув увагу завдяки своїй здатності ефективно протидіяти нестабільності, викликаній різними рівнями потужності вхідного сигналу. Досліди показали нюанси реалізації пасивних схем для забезпечення негативного зворотного зв'язку по струму та стабілізації параметрів фільтра.

У монографії [5] ширша увага приділяється до технологічному прогресу, економічно ефективним рішенням, покращених технічних характеристик, а також включає рішення для покращення стабілізації частоти та амплітуди що безпосередньо сприяє розвитку активних мікрохвильових фільтрів. Надихаючись принципами та методологіями монографії, дослідники можуть працювати над розробкою високопродуктивних, економічно ефективних і стабільних активних мікрохвильових фільтрів, які відповідають вимогам сучасних систем зв'язку та радіолокації.

Підсумовуючи, у роботі [6–9] акцент зроблений на UVЧ-кварцових MEMS-генераторах та їх новітніх застосуваннях, що мають прикладне застосування для активних мікрохвильових фільтрів. Ці осцилятори можуть сприяти підвищенню стабільності, зменшенню фазового шуму та розширеним можливостям інтеграції, що робить їх цінними компонентами при проектуванні та розробці вдосконалених активних мікрохвильових фільтрів для різноманітних радіочастотних та мікрохвильових застосувань.

На завершення, нещодавні дослідження та публікації підкреслюють критичну роль динамічної стабільності в активних мікрохвильових фільтрах у ширшому контексті систем зв'язку, радіолокації та зондування. Ці дослідження поглибили

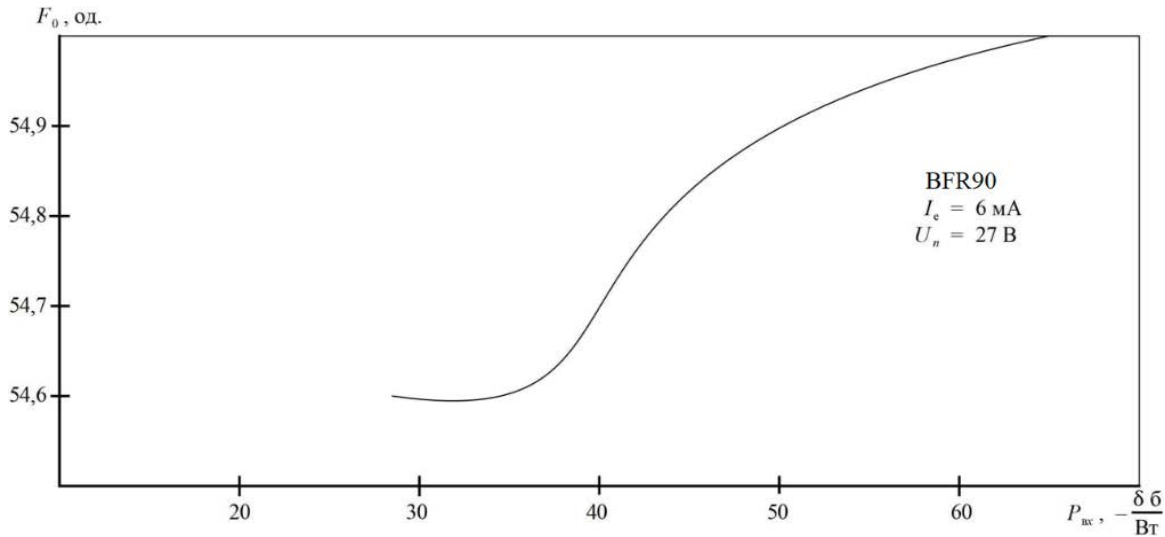


Рис. 1. Експериментальна залежність квазірезонансної частоти F_0 від рівня вхідної потужності без динамічної стабілізації

наше розуміння проблем, пов'язаних із динамічною нестабільністю, і запропонували інноваційні рішення для вирішення цих задач.

Метою роботи є розробка та дослідження активного НВЧ фільтра з такими характеристиками:

1. Динамічний діапазон рівнів потужності вхідного сигналу 20дБ при $P_{вх} = -48\text{дБ} / \text{вт}$ (або при $P_{вх} = -58\text{дБ} / \text{вт}$) у залежності від коефіцієнта передачі активного фільтра.

2. Нерівномірність у смузі пропуску кожного каналу між рівнями потужності на граничних частотах $F_{з.р.н}$ і $F_{з.р.в}$ і на середній F_0 повинна бути не менше 2 дБ.

3. Коефіцієнт передачі поза смуги пропускання повинен бути менше коефіцієнта передачі на середній частоті не менше чим на:

- а) 15 дБ на $(F_{зрн} - 4,5)$ і на $(F_{зрв} + 4,5)$;
- б) 30 дБ на $(F_{зрн} - 9)$ і на $(F_{зрв} + 9)$;
- в) 40 $(F_{зрн} - 20)$ і на $(F_{зрв} + 20)$;

4. При всіх видах випробувань допускається:

а) зміщення частотних характеристик всіх фільтрів вправо чи (вліво) по частоті, но не більше чим на 2 мГц при відносній розбіжності ЧХ сусідніх фільтрів не більше чим 0,2 мГц;

б) зменшення (чи збільшення) коефіцієнта передачі на частотах в смузі пропускання кожного каналу не більше, чим на 1дб;

в) зменшення в коефіцієнті передачі поза смуги пропускання по відношенню до коефіцієнта пере-

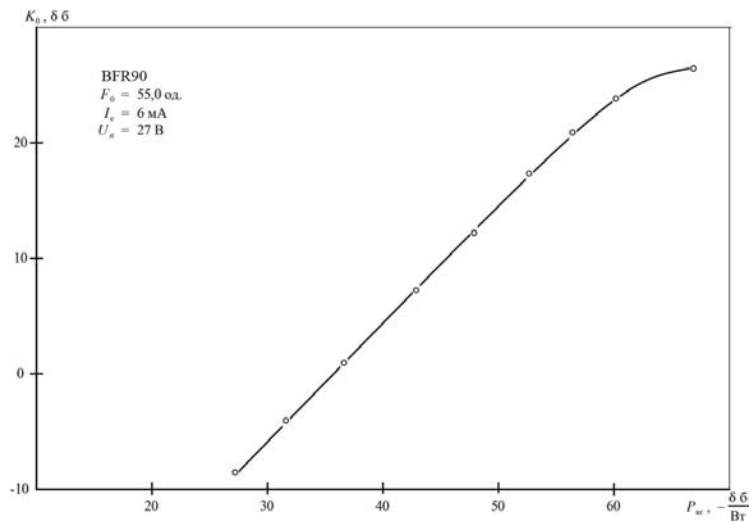


Рис. 2. Експериментальна залежність коефіцієнта передачі K_0 від рівня вхідної потужності $P_{вх}$ без кола динамічної стабілізації

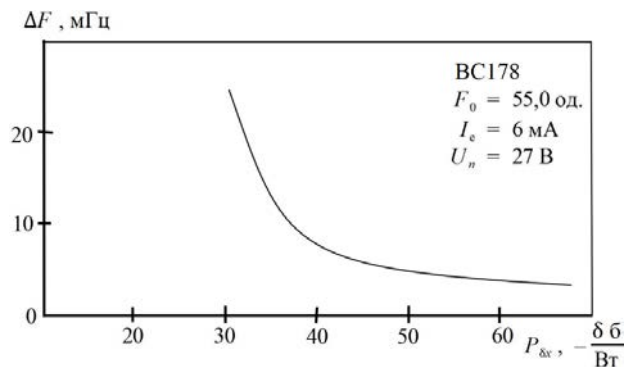


Рис. 3. Експериментальна залежність смуги пропускання ΔF від рівня вхідної потужності без динамічної стабілізації

дачі на середній(чи на будь-якій іншій другій частоті смуги пропускання фільтра з максимальним рівнем вхідної потужності) не менше, ніж на:

- 14 дБ на $(F_{зрн} - 4,5)$ і на $(F_{зрн} + 4,5)$;
- 27 дБ на $(F_{зрн} - 9)$ і на $(F_{зрн} + 9)$;
- 37 дБ на $(F_{зрн} - 20)$ і на $(f_{зрв} \cong (F_{зрв} \pm 120))$,

тобто, у всіх.

Ціллю динамічних випробувань активних НВЧ фільтрів є визначення змін параметрів АЧХ фільтрів в залежності від потужності вхідного сигналу.

Виклад основного матеріалу. Дослідження показали, що застосування невзаємної схеми активного НВЧ фільтра дозволяє підвищити динамічну стабільність фільтра. На рис 1-4; представлені залежності квазірезонансної частоти F_0 , модуля коефіцієнта передачі на цій частоті K_0 , умовної смуги пропускання ΔF і коефіцієнта передачі F_{25} при побудові графіка 25 МГц відносно квазірезонансної частоти від потужності вхідного сигналу.

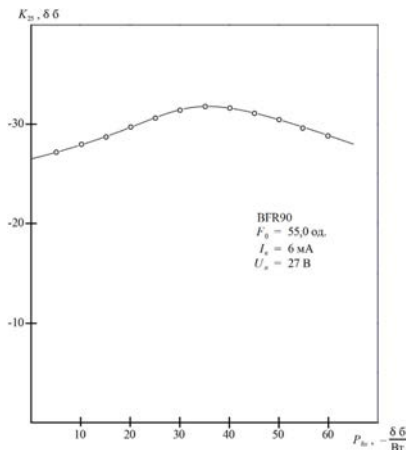


Рис. 4. Експериментальна залежність модуля коефіцієнта передачі K_{25} при відбудові на 25 МГц відносно квазірезонансної частоти

Як видно із графіків в динамічному діапазоні 20 дБ, при мінімальній потужності на виході $-48\text{дБ} / \text{Вт}$, нестабільність вищевказаних параметрів має наступні значення (табл. 1):

Таблиця № 1

№	Назва параметра	Експериментальні дані	Вимоги ТЗ
1.	Квазірезонансна частота	4 МГц	2 МГц
2.	Умовна смуга пропуску	2 МГц	1 МГц
3.	Коефіцієнт передачі на квазірезонансній частоті	10 МГц	1 дБ
4.	Коефіцієнт передачі поза смуги пропуску	5 дБ	3 дБ

Із таблиці 1 слідує, що для забезпечення вимог ТЗ необхідно застосувати коло, що підвищує динамічну стабільність ФАПЧ.

Вимоги до кола динамічної стабілізації і вибір метода

Із результатів експериментальних досліджень, проведених в попередньому параграфі вказує, що зі збільшенням потужності сигналу на вході активного НВЧ фільтра, відбувається зменшення модуля коефіцієнта передачі $|K|$ на квазірезонансній частоті, зменшення квазірезонансної частоти F_0 і розширення смуги пропуску ΔF .

У радіотехніці відомі схеми призначені для автоматичного впливу на динамічні параметри транзисторних пристроїв. Наприклад, схеми автоматичного регулювання підсилення (АРП). АРП використовується в підсилювачів для запобігання перевантаження їх великим вхідним сигналом. У транзисторних підсилювачів підстелення регулюють зміною режиму роботи транзистора або опором навантаження каскаду і кола зворотного зв'язку по змінному струму.

При режимному регулюванні використовується залежність параметрів транзистора і коефіцієнта підсилення каскаду від струму колектора. Зміна колекторного струму відбувається під дією напруги регулювання, залежного від напруги на виході. Напруга регулювання подається на електроди регульованого транзистора безпосередньо або через допоміжний параметричний елемент, в якості якого зазвичай використовують регульований транзистор.

При регулюванні по змінному струму режим роботи каскаду залишається незмінним, а регульований вплив подається на елемент, що утворює коло навантаження каскаду або коло його негативного зворотного зв'язку по змінному струмі. Те, що відбувається під дією вхідної напруги зміни опору цього елемента призводить до відповідної зміни коефіцієнту підсилення каскаду.

Таким чином коефіцієнт підсилення підсилювача з ціллю АРП змінюється в залежності від вихідного сигналу. При побудові активних НВЧ фільтрів необхідно підтримувати постійний коефіцієнт передачі фільтра при зміні потужності вхідного сигналу. Через це, застосовані в справжній час в радіоприймальній апаратурі кола АРП не можуть бути застосовані для підвищення динамічної стабільності активних НВЧ фільтрів загального застосування. Проте, метод АРП може бути використаний для підвищення динамічної стабільності активних НВЧ фільтрів.

Принцип стабілізації динамічних параметрів активних НВЧ фільтрів

Дослідження залежності параметрів активних НВЧ фільтрів від режиму живлення по постійному струму показали, що їх коефіцієнт передачі K_0 , квазірезонансна частота F_0 і смуга пропуску ΔF залежать від режиму живлення по постійному струму.

Ця залежність використана при побудові кола динамічної стабілізації в активних НВЧ фільтрах, що використовують прогонові явища в транзисторах.

При побудові цих кіл виходили з вимог створення активних НВЧ фільтрів з мінімальною кількістю елементів, особливо активних, що дозволяє підвищити температурну стабільність і надійність, зменшити розміри, масу та вартість.

В зв'язку з цим для динамічної стабілізації активних НВЧ фільтрів використовувалися пасивні кола, що забезпечували послідовний негативний зворотній зв'язок по струму. Потрібна глибина зворотного зв'язку забезпечувалась за допомогою вибору величини резистора зв'язку. Принципіальна схема активного НВЧ фільтра з колом динамічної стабілізації представлена на рис. 5.

Керуючий вплив (напруга) знімається з резистора, включеного в НВЧ тракт з активним НВЧ фільтром. Величина керуючої напруги $U_{кер}$ пропорційна потужності НВЧ сигналу (рис. 6). Керуюча напруга подається на перехід «колектор – база» транзистора V_1 і керує напрямом. Ємність C_1 є роздільною. Індуктивності L_1 і L_2 можуть бути виконані або у вигляді високоомних відрізків НВЧ тракту довжиною $\frac{\lambda_g}{4}$ або у вигляді мікрокотушок індуктивності. Застосування останніх дозволяє зменшити розміри активного НВЧ фільтра, но знижує його надійність і технологічність.

У схемі робоча точка забезпечується вибором резистора. В залежності від положення робочої точки на ділянці змінюється діапазон стабілізації рис. 7 – 9.

Принцип роботи кола стабілізації

При збільшенні потужності сигналу $P_{вх}$ збільшується керуюча напруга на резисторі U_p , а коефіцієнт передачі фільтра зменшується. З допомогою індуктивностей L_1 і L_2 воно подається на перехід «колектор – база» транзистора V_1 таким чином, щоб збільшити результативну напругу $U_{кб}$, що призводить до збільшення коефіцієнта передачі фільтра, визвано збільшенням потужності вхідного сигналу.

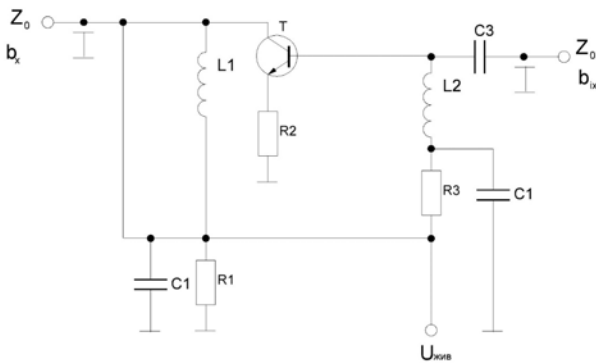


Рис. 5. Принципіальна схема активного НВЧ фільтра з динамічною стабілізацією

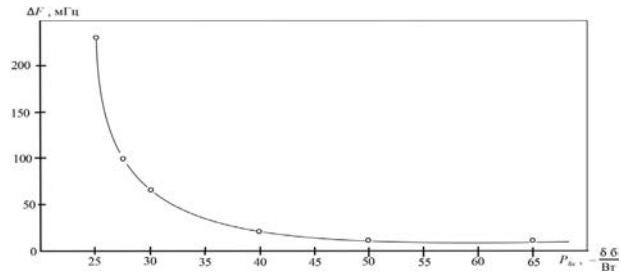


Рис. 6. Експериментальна залежність падіння напруги від зміни вхідної потужності P

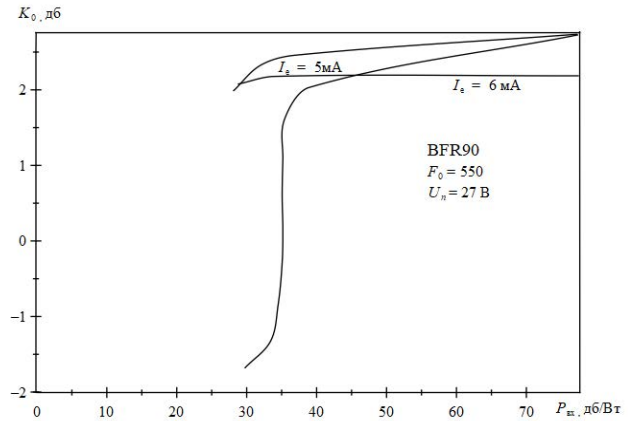


Рис. 7. Експериментальна залежність коефіцієнта K_0 рівня вхідної потужності $P_{вх}$ з цілю стабілізації

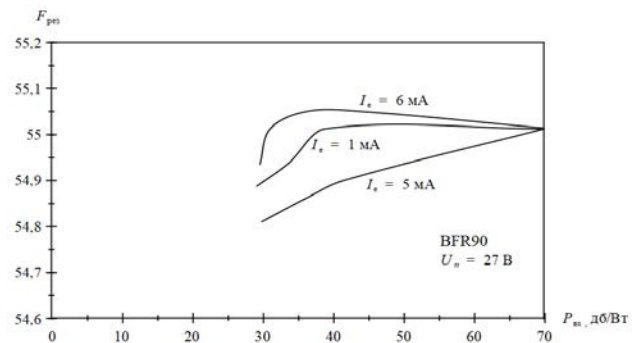


Рис. 8. Експериментальна залежність квазірезонансної частоти $F_{рез}$ від рівня вхідної потужності $P_{вх}$ з цілю стабілізації

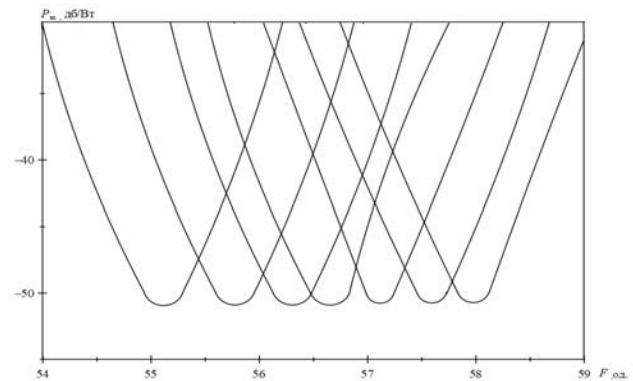


Рис. 9. Експериментальна залежність рівня вхідної потужності від частоти вхідного сигналу F

В таблиці 2 вказані максимальні значення абсолютної динамічної нестабільності параметрів активних НВЧ фільтрів з колом в порівнянні з вимогами ТЗ.

Таблиця 2

№	Назва параметра	Експериментальні дані	Вимоги ТЗ
1.	Максимальний коефіцієнт передачі фільтра	0.5 дБ	1 дБ/вт
2.	Квазірезонансна частота	1 МГц	2 МГц
3.	Умовна смуга пропуску	1 МГц	1 МГц
4.	Коефіцієнт передачі за межею смуги пропуску	2 дБ	3 дБ

Висновки. Аналіз результатів приведених в таблиці 2 показує, що динамічна стабільність

розробленого активного НВЧ фільтру з КДС відповідає вимогам ТЗ. Завдяки ряду експериментів і аналізів ми досягли значних успіхів у характеристиці динамічної поведінки активних мікрохвильових фільтрів. Ці характеристики включили оцінку таких параметрів, як квазірезонансна частота, коефіцієнт передачі та пропускна здатність, усі з яких життєво важливі для їх належного функціонування. Наші результати показали, що за допомогою даної схем динамічної стабілізації ми можемо відповідати або навіть перевищувати вказані технічні вимоги.

По мірі просування вперед постійні дослідження та інновації в цій галузі будуть необхідними для подальшого вдосконалення та впровадження цих динамічних рішень, гарантуючи, що активні мікрохвильові фільтри продовжуватимуть відповідати змінним вимогам сучасних систем зв'язку та навігації.

Список літератури:

1. Suarez A. Check the Stability: Stability Analysis Methods for Microwave Circuits. *IEEE Microwave Magazine*, 2015. Pp. 69–90. doi:10.1109/MMM.2015.2410951
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. *Універсум-Вінниця*. 1999. С.275.
3. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. *ВНТУ*. 2011. С.336. ISBN 978-966-641-405-5.
4. Філінюк М. А., Ліщинська Л. Б. Активні УВЧ і НВЧ фільтри. *ВНТУ*, 2010. С.396.
5. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. *УНІВЕРСУМ-Вінниця*. 2009. С.182.
6. Kubena R. L. Next Generation Quartz Oscillators and Filters for VHF-UHF Systems. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2006. Pp. 668-671. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249703>
7. Chang D., Stratton F., Kubena R., Joyc R. Optimized DRIE Etching of Ultra-Small Quartz Resonators. *Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium*. 2003. Pp. 829-832. doi:10.1109/FREQ.2003.1275198
8. Stratton F. P. A MEMS-based Quartz Resonator Technology for GHz Applications. *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. 2004. Pp. 27-34.
9. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. *Science Publishing*. 2019. Pp. 271–285. ISBN 978-1-9993071-4-1

Osadchuk A.V., Likhoshorskyi S.V. DYNAMIC STABILITY ANALYSIS AND STABILIZATION METHODS FOR ACTIVE MICROWAVE FILTERS

Active microwave filters play a crucial role in modern communication systems, but ensuring their dynamic stability under varying signal power levels remains challenging. This article explores the dynamic characteristics of active microwave filters and proposes methods for their stabilization. Key requirements for these filters include a 20 dB dynamic range of input signal power levels, bandwidth uniformity, and minimal transmission coefficient outside the bandwidth. Various testing methodologies are discussed, highlighting the need for precision and sensitivity due to the small filter bandwidth and wide range of input power levels.

The article presents three measurement schemes with a focus on addressing their limitations. A novel approach utilizing transient phenomena in transistors is introduced to overcome these challenges. This approach involves passive circuits that provide negative current feedback, effectively stabilizing filter parameters in response to changes in input power.

Experimental results demonstrate the effectiveness of dynamic stabilization circuits in maintaining filter performance within specified tolerances. The article concludes by discussing the construction of a multi-channel selection unit based on this dynamic stabilization principle, highlighting its potential for highly selective and low-loss filter designs.

This research offers valuable insights into the dynamic behavior of active microwave filters and provides practical solutions to enhance their stability, making them more reliable components in modern communication systems. By addressing the complexities of dynamic instability, this work contributes to advancing microwave filter technology, enabling the continued evolution of wireless communication and radar systems with improved performance and reliability.

Key words: microwave filters, dynamic stability, signal power levels, transistor-based stabilization, communication systems.