



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28>

УДК 621.375.122

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ФОРМЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОЧАСТОТЫ С ДВОЙНЫМ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

А. Е. КУРОЧКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрены особенности формирования амплитудно-частотных характеристик резонансных усилительных каскадов с двойным автотрансформаторным включением. Выполнено моделирование амплитудно-частотной характеристики резонансного каскада в программе схемотехнического проектирования Multisim. Проведен анализ передаточной функции цепи и выявлены факторы, влияющие на формирование частотной характеристики каскада в широком диапазоне частот. Обращено внимание на нежелательное искажение формы амплитудно-частотной характеристики каскада вне рабочей полосы частот, приводящее к снижению затухания и ухудшению избирательности по побочным каналам приема. Даны рекомендации по улучшению формы амплитудно-частотных характеристик вне рабочей полосы частот за счет параллельного включения автотрансформаторов.

Ключевые слова: усилительные каскады, согласующие цепи, амплитудно-частотная характеристика, автотрансформаторы, компьютерное моделирование, сигнальные графы, формула Мэзона.

Для цитирования. Курочкин, А. Е. Способ улучшения формы амплитудно-частотных характеристик резонансных усилителей радиочастоты с двойным автотрансформаторным включением / А. Е. Курочкин // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28>.

METHOD OF IMPROVING THE SHAPE OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RESONANT RADIO FREQUENCY AMPLIFIERS WITH DOUBLE AUTOTRANSFORMER INCLUSION

ALEXANDER E. KUROCHKIN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Features of formation of amplitude-frequency characteristics of resonant amplifier stages with double autotransformer inclusion are considered. The amplitude-frequency characteristic of the resonant cascade was simulated using the Multisim circuit design program. The transfer function of the circuit is analyzed and the factors influencing the formation of the frequency response of the cascade in a wide frequency range are revealed. Attention is drawn to the undesirable distortion of the shape of the amplitude-frequency response of the cascade outside the operating frequency band, leading to a decrease in attenuation and deterioration of selectivity on the side channels of reception. Recommendations are given for improving the shape of the amplitude-frequency characteristics outside the operating frequency band by parallel connection of autotransformers.

Keywords: amplification stages, matching circuits, amplitude-frequency characteristic, autotransformers, computer modeling, signal graphs, Mason formula.

For citation. Kurochkin A. E. (2025) Method of Improving the Shape of Amplitude-Frequency Characteristics of Resonant Radio Frequency Amplifiers with Double Autotransformer Inclusion. *Doklady BGUIR*. 23 (4), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-21-28> (in Russian).

Введение

В радиоприемных устройствах (РПУ) широко распространены согласующие цепи (СЦ) с двойной автотрансформаторной связью с источником сигнала и нагрузкой [1–3]. Такие цепи применяются в качестве входных и выходных СЦ благодаря возможности обеспечения максимальной передачи при заданной полосе пропускания. На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема резонансного усилителя радиочастоты с двойной автотрансформаторной связью, где: E_n , e_c – источник питания и сигнала соответственно; R_c , C_c – сопротивление и емкость источника сигнала; R_n , C_n – сопротивление и емкость нагрузки.

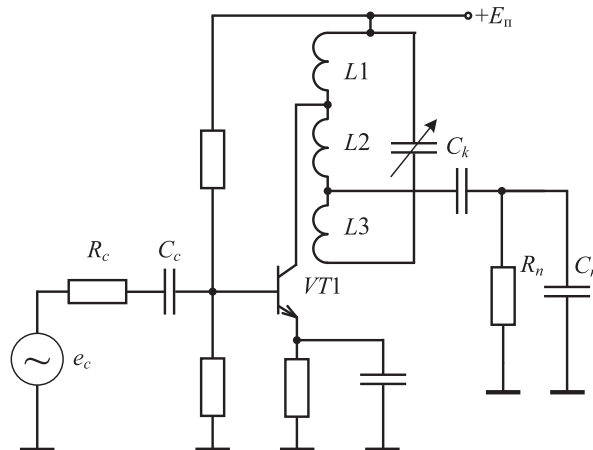


Рис. 1. Резонансный усилитель радиочастоты с двойной автотрансформаторной связью
Fig. 1. Dual autotransformer coupled resonant RF amplifier

В выходной СЦ применено двойное автотрансформаторное включение, т. е. автотрансформаторная связь основного контура с коллектором транзистора и с нагрузкой. Основной колебательный контур содержит катушки $L1$, $L2$, $L3$ и переменный конденсатор C_k . Недостатком всех СЦ с двойной автотрансформаторной связью является наличие нескольких дополнительных резонансных контуров [2, 3]. Первый контур с частотой резонанса f_{01} содержит катушку $L1$ и конденсатор $C_{\text{вых}}$, емкость которого определяется выходной емкостью транзистора $VT1$, емкостью монтажа и собственной емкостью катушки. Контур расположен непосредственно в цепи коллектора и может работать по аналогии с режимами работы входных цепей РПУ в двух режимах: укорочения длины волны ($f_0 < f_{01}$ – работа с повышением частоты) или удлинения длины волны ($f_0 > f_{01}$ – работа с понижением частоты). Второй нежелательный контур образуется емкостью нагрузки C_n совместно с индуктивностью катушек СЦ с частотой резонанса f_{02} . Этот контур расположен непосредственно в цепи нагрузки. В зависимости от соотношения резонансных частот f_0 , f_{01} , f_{02} основного и дополнительных контуров имеет место значительное ухудшение формы амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) на частотах ниже или выше рабочей частоты, что может привести к уменьшению затухания и степени подавления побочных каналов приема, таких как прямой и зеркальный каналы. В статье рассматривается способ модернизации выходной СЦ и улучшения формы АЧХ и, следовательно, избирательности по побочным каналам приема.

Проведение эксперимента

Проверка функционирования каскада (рис. 2) производилась путем моделирования в программе схемотехнического проектирования Multisim при емкости основного контура $C3 = 400$ пФ и емкости нагрузки $C5$ от 5 до 160 пФ. АЧХ каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C5 = \text{var}$ изображены на рис. 3. Как видно из результатов моделирования, наблюдается ухудшение формы АЧХ в области частот выше резонансной. Кроме основного резонанса, на частоте $f_0 \approx 330$ кГц (самый левый максимум) наблюдаются резонансы контура $L2C5$ на множестве частот f_{02} более 500 кГц. Также отмечается значительный подъем АЧХ в широкой области частот, обусловленный наличием контура $L1C_{\text{вых}}$ в режиме укорочения, о чем можно судить по росту напряжения на резонансных частотах f_{02} по мере приближения к f_{01} (сосредоточение множества максимумов в районе 10 МГц). Кроме того, наблюдается провал АЧХ на частоте $f_{03} \approx 500$ кГц, что обусловлено образованием элементами $L3$ и $C3$ последовательного резонансного контура.

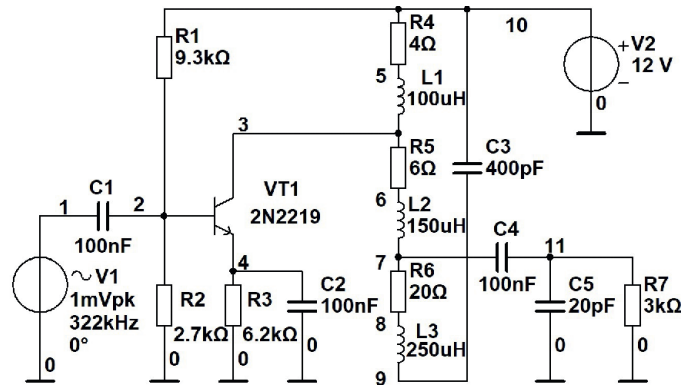


Рис. 2. Схема каскада с двойной автотрансформаторной связью в программе Multisim
Fig. 2. Schematic diagram of the cascade with double autotransformer coupling in Multisim program

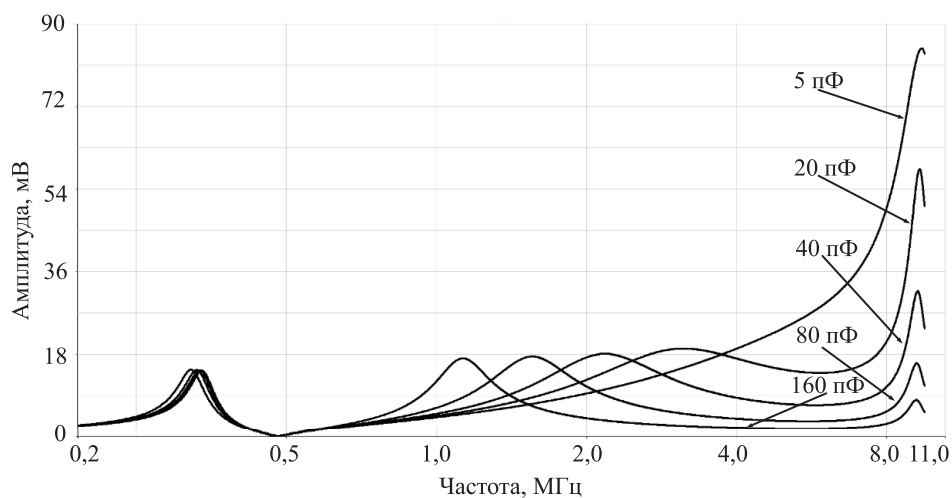


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C5 = \text{var}$
Fig. 3. Amplitude-frequency characteristics of a cascade with double autotransformer coupling at $C5 = \text{var}$

На рис. 4 представлены результаты моделирования при емкости нагрузки $C5 = 20$ пФ и значениях емкости основного контура $C3$ от 20 до 400 пФ. Хорошо видны три явления: ярко выраженный резонанс коллекторной цепи из-за режима укорочения в районе 10 МГц, рост резонансного коэффициента передачи основного контура по мере приближения к частоте резонанса укороченной коллекторной цепи и наличие нуля передачи из-за контура $L3C3$.

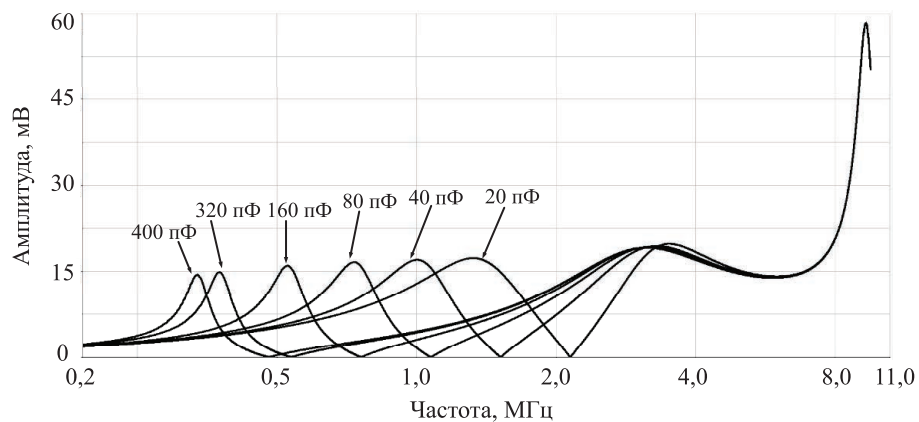


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики каскада с двойной автотрансформаторной связью при $C3 = \text{var}$
Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the cascade with double autotransformer coupling for $C3 = \text{var}$

Эквивалентная схема каскада, изображенного на рис. 2, соответствует рис. 5, а (где Z_c – импеданс источника сигнала, $Z_c = R_c + 1/j\omega C_c$), а на рис. 5, b представлен сигнальный граф.

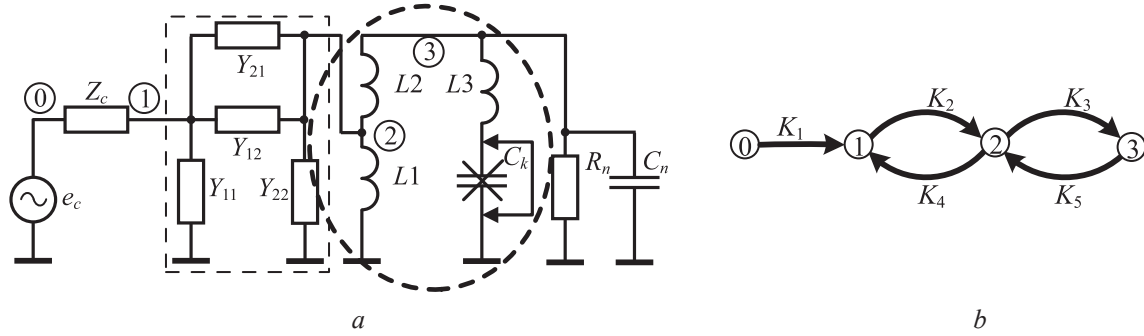


Рис. 5. Эквивалентная схема каскада (а) и сигнальный граф (b)
Fig. 5. Equivalent circuit of the cascade (a) and signal graph (b)

Расчет коэффициентов передачи ветвей графа на рис. 5, b производился по формулам:

$$K_1 = \frac{Y_c}{Y_c + Y_{11}}; K_2 = \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; K_3 = \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_n + \frac{1}{Z_{Ck} + Z_{L3}}}; K_4 = \frac{Y_{12}}{Y_c + Y_{11}}; K_5 = \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}},$$

где $Y_c = 1/R_c + j\omega C_c$; $Y_n = 1/R_n + j\omega C_n$; $j\omega$ – комплексная текущая круговая частота; $Z_{Ck} = 1/Y_{Ck}$; $Y_{Ck} = j\omega C_k$; $Y_{L1} = 1/R_p - j1/\omega L_1$; $Y_{L2} = 1/R_p - j1/\omega L_2$; $Z_{L3} = 1/Y_{L3}$; $Y_{L3} = 1/R_p - j1/\omega L_3$; R_p – сопротивление потерь в катушках индуктивности; Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} – входная проводимость, проводимость обратной и прямой передачи, выходная проводимость биполярного транзистора соответственно.

Передаточная функция цепи в соответствии с графом определяется по формуле Мэзона

$$T = \frac{K_1 K_2 K_3}{1 - K_2 K_4 - K_3 K_5}. \quad (1)$$

После элементарных преобразований получаем

$$T = \frac{Y_{21} Y_{L2} (Y_{Ck} + Y_{L3})}{(Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}) [Y_n (Y_{Ck} + Y_{L3}) + Y_{Ck} Y_{L3}] + (Y_{22} + Y_{L1}) (Y_{Ck} + Y_{L3}) Y_{L2}}. \quad (2)$$

В формуле (2) сомножитель в числителе определяет нуль коэффициента передачи всей цепи

$$Y_{Ck} + Y_{L3} = j\omega C_k + 1/j\omega L_3 = (1 - \omega^2 L_3 C_k) / j\omega L_3. \quad (3)$$

Для выяснения природы остальных упомянутых выше явлений рассмотрим подробнее схему выходной цепи. На частотах, значительно превышающих основную резонансную частоту, сопротивление контурного конденсатора C_k стремится к нулю. Поэтому можно считать, что нижний вывод катушки L_3 подключен к общему проводу (на рис. 5, а показана закорачивающая перемычка). Передаточная функция выходной цепи в этом случае определяется выражением

$$\begin{aligned} T_{\text{вых}} &= \frac{K_2 K_3}{1 - K_3 K_5} = \frac{\frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}} \cdot \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{L3} + Y_n}}{1 - \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{L3} + Y_n} \cdot \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}} = \\ &= \frac{Y_{21} Y_{L2}}{Y_{22} Y_{L2} + Y_{22} Y_{L3} + Y_{22} Y_n + Y_{L1} Y_{L2} + Y_{L1} Y_{L3} + Y_{L1} Y_n + Y_{L2} Y_{L3} + Y_{L2} Y_n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем некоторые упрощающие допущения. Проводимость $Y_{22} = 1/Z_{22}$, где импеданс Z_{22} – это внутреннее выходное сопротивление транзистора, которое можно считать идеальным и принять $Z_{22} = \infty$, или $Y_{22} = 0$. Также будем считать, что активное сопротивление нагрузки $R_n = \infty$. Тогда после преобразований получим

$$T_{\text{вых}} = \frac{Y_{21}Y_{L2}}{Y_{L1}Y_{L2} + Y_{L1}Y_{L3} + Y_{L1}Y_n + Y_{L2}Y_{L3} + Y_{L2}Y_n} = \frac{j\omega L_1 L_3 Y_{21}}{L_1 + L_2 + L_3 - \omega^2 L_3 C_n (L_1 + L_2)}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что нагрузочная цепь действительно обладает резонансной частотой

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_3(L_1 + L_2)C_n}} = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{экв}}C_n}}, \quad (6)$$

чем и объясняется появление всплеска амплитуды на частоте f_{02} выше основной рабочей частоты во всех эпизодах моделирования цепи в программе Multisim (рис. 3). В (6) L_1, L_2, L_3 – индуктивности катушек; $L_{\text{экв}}$ – эквивалентная индуктивность. Так как избавиться от этого резонанса невозможно, то рекомендация может заключаться только в максимальном уменьшении емкости нагрузки.

Рассмотрим явление, связанное с ростом резонансного коэффициента передачи и подъемом АЧХ в широкой области частот на всем протяжении выше резонансной рабочей частоты. Для этого упростим схему СЦ, принимая $C_n = 0, R_n = \infty$. Из рис. 4 видно, что в этом случае эквивалентная нагрузка для выходного источника тока транзистора до частоты резонанса f_{01} укороченной коллекторной цепи имеет индуктивный характер, что приводит к росту выходного напряжения с увеличением частоты, а коэффициент передачи из узла 2 в узел 3 (рис. 5) является частотно-независимым и определяется соотношением индуктивностей L_2 и L_3 . И это справедливо для любых значений контурной емкости C_k .

Таким образом, основные причины искажения формы АЧХ цепи с двойной автотрансформаторной связью заключаются в наличии сильной связи между коллектором транзистора и выходом СЦ, которая определяется параметрами индуктивного делителя, образованного обмотками автотрансформатора.

Модернизация выходной согласующей цепи

Устранить сильную связь между выходом источника сигнала и выходом цепи можно, применив СЦ с двумя параллельными автотрансформаторами (рис. 6). Элементом связи между выходом источника сигнала и выходом цепи здесь является фильтр, состоящий из элементов $L2$ и $C3$, коэффициент передачи которого в диапазоне частот, выше основной резонансной, уменьшается с ростом частоты, что и обеспечивает увеличение затухания вне рабочей полосы частот и улучшение избирательности каскада по побочным каналам.

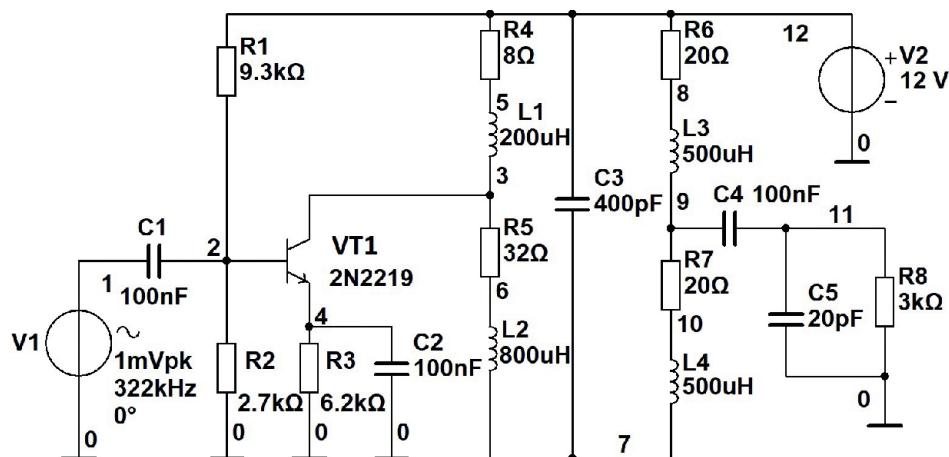


Рис. 6. Схема каскада с двумя параллельными автотрансформаторами
Fig. 6. Schematic diagram of a cascade with two parallel autotransformers

Результат моделирования модернизированного каскада в Multisim при значениях емкости основного контура $C3 = 400$ пФ и емкости нагрузки $C5$ от 5 до 160 пФ представлен на рис. 7 при линейной шкале по амплитуде. Из рисунка видно, что второй резонанс на частотах f_{02} , выше основного, по-прежнему остается. Но, если при $C5 = 160$ пФ всплеск еще достаточно ярко выражен, хотя и гораздо меньшего уровня, то при $C5 = 80$ пФ всплеска амплитуды уже практически

не наблюдается. Характерного подъема АЧХ в широкой области выше резонансной частоты f_0 в улучшенном варианте из-за фильтра нижних частот $L2C3$ также нет.

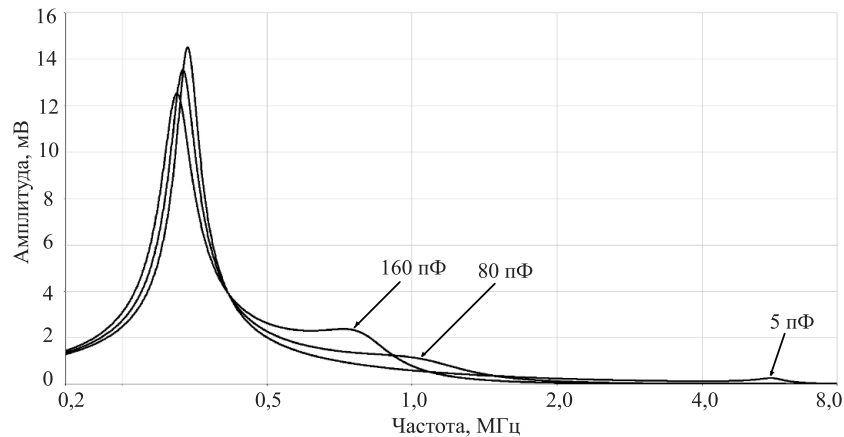


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики с линейной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C5 = \text{var}$
Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics with a linear amplitude scale of the improved cascade at $C5 = \text{var}$

Степень подавления сигналов в области частот вне рабочей полосы можно оценить по рис. 8, где представлен график АЧХ при октавном разбиении амплитудной шкалы.

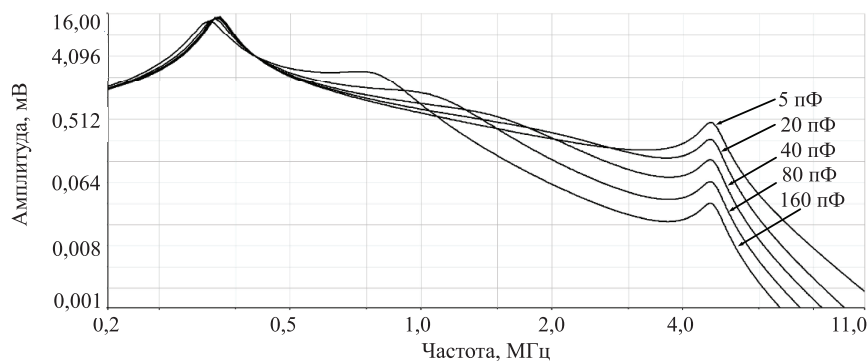


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики с октавной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C5 = \text{var}$
Fig. 8. Amplitude-frequency characteristics with an octave amplitude scale of the improved cascade at $C5 = \text{var}$

На рис. 9 показан результат моделирования модернизированного каскада при постоянной емкости нагрузки $C5 = 20$ пФ и значениях емкости основного контура $C3$ от 20 до 400 пФ при линейной шкале по амплитуде, а на рис. 10 – при октавном разбиении амплитудной шкалы.

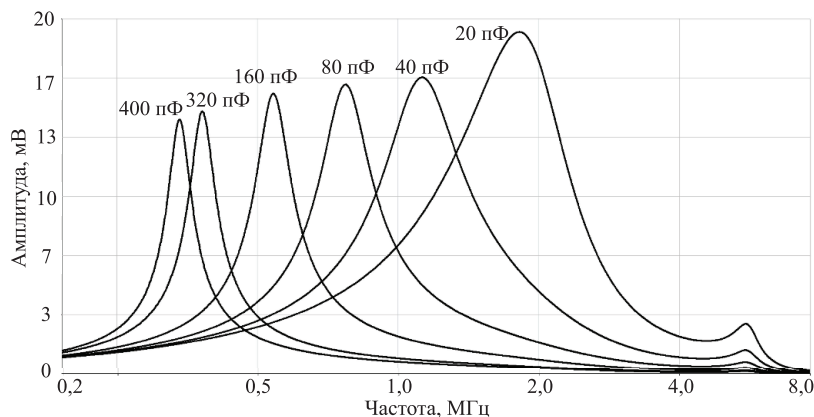


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики с линейной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C3 = \text{var}$
Fig. 9. Amplitude-frequency characteristics with a linear amplitude scale of the improved cascade at $C3 = \text{var}$

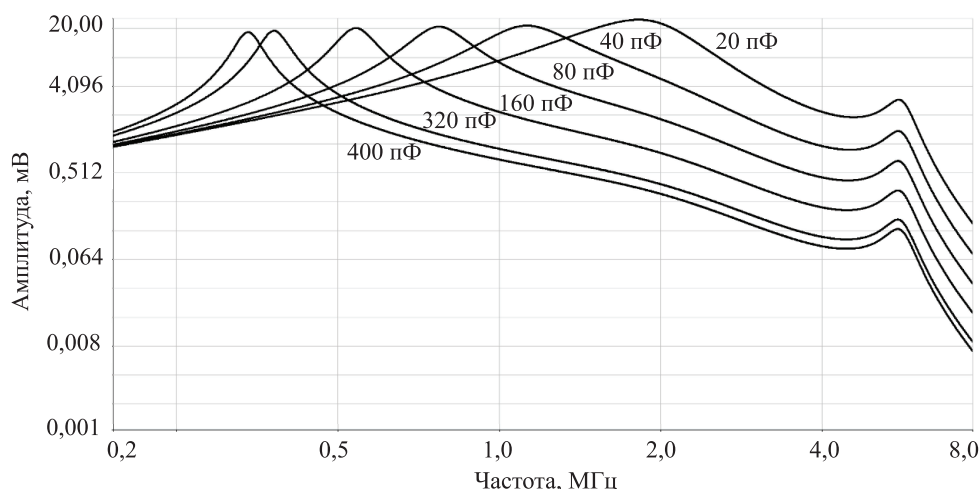


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики с октавной амплитудной шкалой улучшенного каскада при $C3 = \text{var}$

Fig. 10. Amplitude-frequency characteristics with an octave amplitude scale of the improved cascade at $C3 = \text{var}$

По результатам сравнения моделирования на рис. 4 и 9 очевидно, что модернизированный каскад с двумя параллельными автотрансформаторами с точки зрения формы АЧХ обладает значительно более высокими параметрами по сравнению с классической схемой с двойной автотрансформаторной связью. На рис. 11 представлена эквивалентная схема (a) и сигнальный граф (b) улучшенного варианта каскада усилителя радиочастоты.

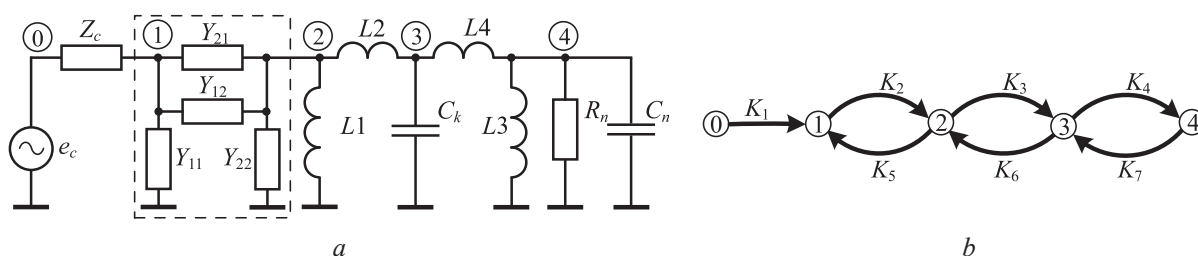


Рис. 11. Эквивалентная схема (a) и сигнальный граф (b) улучшенного варианта каскада усилителя радиочастоты

Fig. 11. Equivalent circuit (a) and signal graph (b) of an improved version of the RF amplifier stage

Передающая функция каскада в соответствии с сигнальным графом на рис. 11, b определяется выражением

$$T = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4}{1 - K_2 K_5 - K_3 K_6 - K_4 K_7 + K_2 K_5 K_4 K_7}, \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{Y_c}{Y_c + Y_{11}}; \quad K_2 = \frac{Y_{21}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; \quad K_3 = \frac{Y_{L2}}{Y_{L2} + Y_{Ck} + Y_{L4}}; \quad K_4 = \frac{Y_{L4}}{Y_{L3} + Y_{L4} + Y_n}; \quad K_5 = \frac{Y_{12}}{Y_c + Y_{11}};$$

$$K_6 = \frac{Y_{L2}}{Y_{22} + Y_{L1} + Y_{L2}}; \quad K_7 = \frac{Y_{L4}}{Y_{L2} + Y_{Ck} + Y_{L4}}.$$

Численный расчет полученного выражения подтверждает корректность математической модели и соответствие результатам моделирования в программе Multisim. Таким образом, в результате введения параллельного включения автотрансформаторов, каждый из которых обеспечивает заданную степень связи основного контура с источником и нагрузкой, позволяет улучшить форму АЧХ в широком диапазоне частот и подавить побочные каналы приема.

Заключение

1. Рассмотрен резонансный усилитель радиочастоты с двойной автотрансформаторной согласующей цепью. Представлен анализ передаточной функции каскада с использованием теории сигнальных графов.

2. Установлены причины, ухудшающие форму амплитудно-частотных характеристик и избирательность выходной согласующей цепи с двойной автотрансформаторной связью основного колебательного контура с выходом каскада и нагрузкой.

3. Предложена реализация выходной согласующей цепи с двумя параллельными автотрансформаторами для связи основного контура с выходом каскада и нагрузкой.

4. Результаты моделирования подтверждена работоспособность предлагаемого модернизированного варианта резонансного каскада, обладающего повышенной избирательностью по каналам приема вне рабочей полосы частот.

Список литературы

1. Inder, J. Bahl. *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers* / Inder J. Bahl. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Publ., 2009.
2. Радиоприемные устройства / Н. Н. Фомин [и др.]. М.: Горячая линия–Телеком, 2007.
3. Колосовский, Е. А. Устройства приема и обработки сигналов / Е. А. Колосовский; 2-е изд. М.: Горячая линия–Телеком, 2012.

Поступила 11.03.2025

Принята в печать 14.04.2025

References

1. Inder J. Bahl (2009) *Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Publ.
2. Fomin N. N., Buga N. N., Golovin O. V., Kubitsky A. A., Levin V. A., Plaksienko V. S., et al. (2007) *Radio Receivers*. Moscow, Hot Line–Telecom (in Russian).
3. Kolosovskiy E. A. (2012) *Signal Reception and Processing Devices*. Moscow, Hot Line–Telecom (in Russian).

Received: 11 March 2025

Accepted: 14 April 2025

Сведения об авторе

Курочкин А. Е., канд. техн. наук, доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-43
E-mail: kurochkin@bsuir.by
Курочкин Александр Евдокимович

Information about the author

Kurochkin A. E., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-43
E-mail: kurochkin@bsuir.by
Kurochkin Alexander Evdokimovich