УДК 621.375.026

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Матёкубов У.К.[1], Мурадов М.М.[1], Улашов С.Р.[2]

[1]Ургенчский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, Ургенч, Узбекистан

[2]Ассоциация "Узэлтехсаноат", Ташкент, Узбекистан, sr.ulashov@gmail.com

Аннотация: высокочастотный усилитель мощности определяет энергопотребление и качество передачи базовых станций мобильной связи, а его устойчивость и энергоэффективность зависят от топологии электронной схемы и параметров элементов. Проанализированы составные части схемы (активный прибор, согласующие цепи, цепи смещения, стабилизации и обратной связи), топологии (однотактная, каскодная, двухтактная, балансная) и архитектуры повышения эффективности (Доэрти, слежение за огибающей, Шире, F-класс); обобщено влияние топологических признаков на показатели качества. Установлено, что существующие подходы не описывают топологию в целостном параметризованном виде и не учитывают неопределённость параметров элементов на схемном уровне, что обусловливает необходимость формального (топологического) описания и интервальных методов оценки.

Ключевые слова: высокочастотный усилитель; топология схемы; устойчивость; энергоэффективность; GaN HEMT; усилитель Доэрти; чувствительность; неопределённость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Энергопотребление и качество сигнала базовой станции (БС) мобильной связи в значительной степени определяются высокочастотным усилителем мощности: модель мощности БС связывает радиочастотную мощность на антенне с полной потребляемой мощностью станции, и усилитель является одним из ключевых звеньев этой цепи [1]. В системах 5G высокие частоты, широкая полоса канала и сигналы с большим пик-фактором (PAPR) требуют от усилителя одновременно высокой эффективности, линейности и устойчивости [2, 3]. Показатели усилителя определяются не только технологией активного прибора, но и топологией схемы – согласующими цепями, цепями смещения, стабилизации и обратной связи и порядком их соединения, однако в литературе топологии, как правило, рассматриваются по отдельности. Цель работы – проанализировать влияние составных частей и топологических признаков схемы усилителя на устойчивость и энергоэффективность и на этой основе выявить научные пробелы.

II. АНАЛИЗ СХЕМОТЕХНИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

a. Составные части схемы и активные приборы

Схема высокочастотного усилителя состоит из нескольких функциональных цепей: активного прибора (транзистора), входной и выходной согласующих цепей, цепи смещения (задания рабочей точки), а также цепей стабилизации и обратной связи [2]. На высоких частотах на поведение схемы влияют паразитные индуктивности и ёмкости проводников, контактов и корпуса, поэтому при анализе применяются подход с распределёнными параметрами и матрица рассеяния (S-параметры) [4]. В качестве активного прибора в усилителях БС традиционно используется LDMOS-транзистор, а для 5G – GaN HEMT благодаря высокой удельной мощности, высокому рабочему напряжению и широкополосности [5]. Малосигнальная эквивалентная схема полевого транзистора описывается крутизной g_m, ёмкостями C_{gs}, C_{gd}, C_{ds} и выходным сопротивлением r_{ds}. Ёмкость затвор–сток C_{gd} влияет на вход через эффект Миллера: коэффициент усиления по напряжению и входная ёмкость определяются выражениями [4]:

$$A_v = -g_m(r_{ds} \parallel R_L), \tag{1}$$

$$C_{in} = C_{gs} + (1 + |A_v|)C_{gd}. \tag{2}$$

Из (2) видно, что влияние C_{gd} пропорционально усилению: она увеличивает входную ёмкость, ограничивает полосу и, создавая обратную связь между входом и выходом, влияет на устойчивость. В каскодной топологии усиление первого транзистора близко к единице, поэтому эффект Миллера ослабляется (рис. 1, а). В режиме большого сигнала нелинейность описывают эмпирические модели, например модель Ангелова (Chalmers): они позволяют прогнозировать AM–AM- и AM–PM-

характеристики, гармонические и интермодуляционные искажения, но требуют экстракции множества параметров для каждого прибора [6].

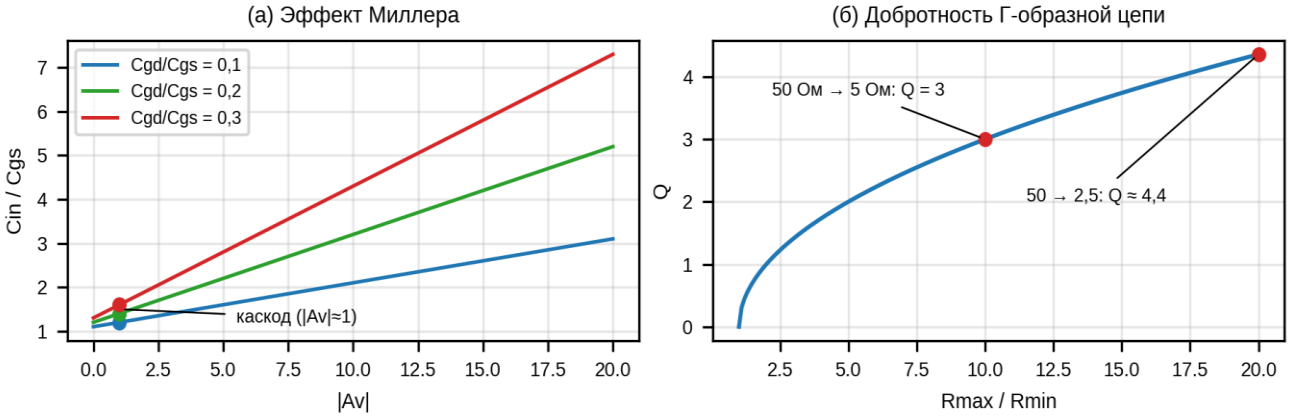


Рисунок 1. Расчёты на схемном уровне: (а) эффект Миллера – зависимость входной ёмкости от усиления (кружки – каскод); (б) добротность Г-образной согласующей цепи

б. Согласующие цепи, цепи смещения и стабилизации, топологии

Согласующие цепи приводят сопротивления источника и нагрузки к оптимальным для активного прибора значениям. Добротность Г-образной цепи определяется отношением согласуемых сопротивлений (R_{max}, R_{min} — большее и меньшее сопротивления):

$$Q = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_{min}} - 1}. \quad (3)$$

Чем больше Q, тем уже полоса [4]; например, при согласовании 50 Ом с 5 Ом Q = 3, с 2,5 Ом — $Q \approx 4{,}4$ (рис. 1, б). Цепь смещения задаёт рабочую точку и класс усилителя (A, AB, B, C): приближение напряжения на затворе к напряжению отсечки уменьшает угол отсечки и повышает эффективность, но ухудшает линейность [2, 3]. В линейном приближении устойчивость оценивается критериями Роллетта (K) и Эдвардса–Синского (μ) [4, 7]; при большом сигнале возможны дополнительные параметрические колебания, поэтому необходим нелинейный анализ устойчивости [8]. Стабилизация (резистор, вырождение в цепи истока, частотно-зависимые цепи) обычно несколько снижает усиление и эффективность; отрицательная обратная связь ($A_f = A/(1 + \beta A)$) улучшает линейность и полосу, но уменьшает усиление. Однотактная топология проста, но ограничена по мощности и линейности; каскодная ослабляет эффект Миллера, повышая устойчивость и усиление, но требует повышенного напряжения питания; двухтактная подавляет чётные гармоники, но требует балунов; балансная обеспечивает хорошее согласование, устойчивость и резервирование, но требует вдвое большего числа элементов [2].

в. Архитектуры повышения эффективности

Для повышения средней эффективности при сигналах с большим PAPR применяются архитектуры Доэрти, слежения за огибающей (ET), Шире (outphasing) и гармоническая терминация классов F/F^{-1} [3]. Усилитель Доэрти предложен в 1936 г. [9] и остаётся одним из наиболее распространённых решений в современных сотовых БС [10]; в нём нагрузка основного усилителя модулируется током пикового усилителя:

$$R_{\text{осн}} = R_{opt}\left(1 + \frac{I_{\text{пик}}}{I_{\text{осн}}}\right). \quad (4)$$

Полоса классической схемы ограничена узкополосными λ/4-линиями [10]. GaN MMIC-усилитель Доэрти в полосе 4,1–5,6 ГГц показал КПД по стоку 38,5–46,5 % при отступлении на 6 дБ (back-off) [11]. При сравнении усилителей Доэрти и outphasing на GaN-on-Si outphasing превосходил по максимальному КПД по добавленной мощности (PAE) (58,3 % и 44,2 %), а усилитель Доэрти — по линейности и эффективности при отступлении 7,5 дБ (38,5 % и 26,1 %) [12]. Основные проблемы архитектуры Доэрти — линейность, эффективность в режиме back-off, полоса и тепловой режим [13]. В целом все архитектуры вносят дополнительные топологические элементы и усложняют настройку (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ архитектур повышения эффективности

Архитектура	Принцип повышения эффективности	Полоса / сложность	Основное ограничение
Доэрти	Модуляция нагрузки	Средняя / средняя	Узкая полоса (λ/4-линии), требования к линеаризации [10, 12]
Слежение за огибающей (ET)	Адаптация питания по огибающей	Широкая / высокая	Нужен быстрый модулятор огибающей [3]
Шире (outphasing)	Разделение по фазе	Средняя / высокая	Сложность сумматора и настройки; в back-off эффективность ниже, чем у Доэрти [12]
Классы F / F^{-1}	Гармоническая терминация	Узкая / средняя	Точность гармонических цепей [3]

г. Паразитные элементы, тепловые эффекты и неопределённость

В MMIC-исполнении необходим точный учёт распределённых элементов и паразитных связей. Индуктивности выводов и ёмкости контактов снижают эффективную частоту среза; например, паразитная индуктивность истока создаёт отрицательную обратную связь и уменьшает усиление [4]. В мощном усилителе существует обратная связь между температурой кристалла и g_m: рост температуры снижает g_m и усиление, что изменяет рассеиваемую мощность; поэтому применяются теплораспределители, тепловые переходные отверстия и подложки с высокой теплопроводностью (GaN-on-SiC) [5]. В результате разброс параметров элементов, рабочей точки и температуры приводит к отклонению устойчивости и эффективности от номинальных значений. Чувствительность этого отклонения к параметру x_i определяется как относительное изменение:

$$S_{x_i}^{y} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, \tag{5}$$

где y – показатель (запас устойчивости или эффективность).

При традиционном проектировании разброс оценивают методом Монте-Карло; он требует большого числа расчётов и не даёт гарантированных (наихудших) границ. Робастные подходы на основе множества Парето, учитывающие неопределённость параметров, в последние годы предлагаются для выбора размеров GaN HEMT [14]. Средства EDA (S-параметры, гармонический баланс, электромагнитное моделирование, load-pull) обеспечивают высокую точность, но ресурсоёмки и не дают прозрачного аналитического выражения, связывающего топологию с показателями [2, 8]. Влияние топологических признаков на показатели качества обобщено в табл. 2.

Таблица 2. Влияние топологических признаков на показатели качества усилителя

Топологический признак	Влияющий показатель	Механизм влияния
Тип и размер активного прибора	Мощность, f_T/f_{max}, эффективность	Крутизна и ёмкости
Каскодное включение	Устойчивость, усиление	Ослабление эффекта Миллера (C_{gd})
Согласующая цепь (Q)	Полоса, эффективность, согласование	Трансформация импеданса
Смещение (рабочая точка)	Эффективность, линейность	Угол отсечки
Модуляция нагрузки (Доэрти)	Эффективность в back-off	Динамическое изменение нагрузки
Паразитные элементы	Частота среза, усиление, устойчивость	Индуктивность выводов и ёмкость

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показал: (1) каждый показатель качества усилителя связан с одним или несколькими топологическими признаками (табл. 2), и эти связи количественно выражаются через параметры элементов; (2) различные топологии и архитектуры предлагают разный компромисс между устойчивостью и эффективностью, но единого параметризованного описания, связывающего их топологические признаки с показателями качества, не существует; (3) паразитные элементы, смещение рабочей точки, нагрев и технологический разброс порождают неопределённость, системный учёт

которой на схемном уровне развит недостаточно: метод Монте-Карло не даёт гарантированных границ, а средства EDA ресурсоёмки. Поэтому перспективным направлением является формальное (топологическое) описание схемы усилителя, расчёт функций чувствительности и интервальная оценка устойчивости и эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] How much energy is needed to run a wireless network? / G. Auer [et al.] // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, No 5. P. 40–49. https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056691.

[2] Cripps, S. C. RF Power Amplifiers for Wireless Communications / S. C. Cripps. 2nd ed. Boston – London: Artech House, 2006.

[3] Power amplifiers and transmitters for RF and microwave / F. H. Raab [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, No 3. P. 814–826.

[4] Pozar, D. M. Microwave Engineering / D. M. Pozar. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2012.

[5] GaN-based RF power devices and amplifiers / U. K. Mishra [et al.] // Proceedings of the IEEE. 2008. Vol. 96, No 2. P. 287–305.

[6] A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices / I. Angelov, H. Zirath, N. Rorsman // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, No 12. P. 2258–2266.

[7] A new criterion for linear 2-port stability using a single geometrically derived parameter / M. L. Edwards, J. H. Sinsky // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, No 12. P. 2303–2311.

[8] Suárez, A. Analysis and Design of Autonomous Microwave Circuits / A. Suárez. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2009.

[9] Doherty, W. H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves // Proceedings of the IRE. 1936. Vol. 24, No 9. P. 1163–1182.

[10] Breaking the bandwidth limit: A review of broadband Doherty power amplifier design for 5G / G. Nikandish, R. B. Staszewski, A. Zhu // IEEE Microwave Magazine. 2020. Vol. 21, No 4. P. 57–75.

[11] Broadband GaN MMIC Doherty power amplifier using continuous-mode combining for 5G sub-6 GHz applications / J. Pang [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2022. Vol. 57. P. 2143–2154.

[12] A Comparative Analysis of Doherty and Outphasing MMIC GaN Power Amplifiers for 5G Applications / V. Díez-Acereda [et al.] // Micromachines. 2023. Vol. 14, No 6. Art. 1205. https://doi.org/10.3390/mi14061205.

[13] Advanced Doherty Power Amplifier Architectures for 5G Handset Applications: A Comprehensive Review of Linearity, Back-Off Efficiency, Bandwidth, and Thermal Management / S. He, H. Chen // Chips. 2025. Vol. 4, No 2. Art. 20. https://doi.org/10.3390/chips4020020.

[14] Robust Pareto Transistor Sizing of GaN HEMTs for Millimeter-Wave Applications / R. Perez Martinez, S. Boyd, S. Chowdhury // IEEE Access. 2025. Vol. 13. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3543787.

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY AMPLIFIER CIRCUIT TOPOLOGY ON STABILITY AND ENERGY EFFICIENCY IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS: AN ANALYTICAL REVIEW

U.K. Matyokubov[1], M.M. Muradov[1], S.R. Ulashov[2]

[1]Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni, Urgench, Uzbekistan

[2]"Uzeltekhsanoat" Association, Tashkent, Uzbekistan, sr.ulashov@gmail.com

Abstract: the high-frequency power amplifier largely determines the energy consumption and transmission quality of mobile base stations, and its stability and efficiency depend on the circuit topology and the parameters of its elements. The paper analyses the components of the amplifier circuit (active device, matching, bias, stabilisation and feedback networks), circuit topologies (single-ended, cascode, push-pull, balanced) and efficiency-enhancement architectures (Doherty, envelope tracking, Chireix, class-F) and generalises the influence of topological features on quality indicators. Existing approaches are shown not to describe topology in a holistic parametrised form and not to account systematically for the uncertainty of element parameters at circuit level, which calls for formal (topological) circuit description and interval assessment methods.

Keywords: high-frequency amplifier; circuit topology; stability; energy efficiency; GaN HEMT; Doherty amplifier; sensitivity; uncertainty.