



А. Хабай^{1,2}, Е.А. Тулешов^{1*}, Н.Т. Тұрар¹, Ж.Н. Исабеков¹, А.Е. Назырова³

¹Satbayev University,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, қ-сі. Сатпаева, 22а

²Алматы Технологиялық Университеті,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, қ-сі. Төле би көшесі, 100

³Л.Н. Гумилёв атындағы Еуразия ұлттық университеті,

10000, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2

*e-mail: y.tuleshov@satbayev.university

5G МОБИЛЬДІ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ТОКТЫҚ РЕЖИМДЕ ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ҚУАТ КҮШЕЙТКІШІНІҢ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІНЕ ТАЛДАУЫ

Аңдатпа: Бұл мақалада 5G мобильді байланыс жүйелерінің FR1 (6 ГГц-ден кіші) диапазонында, нақтырақ айтқанда 3,4-3,8 ГГц аймағында қолдануға арналған тоқтық режимдегі D-класс қуат күшейткішінің (CMCD) жұмыс принципі, энергия тиімділігі және жиілікке тәуелді сипаттамалары қарастырылады. Күшейткіш коммутациялық режимде жұмыс істейтін классикалық push-pull CMCD архитектурасына негізделген және ток пен кернеу толқындарының уақыт бойынша қабаттаспауын қамтамасыз ету арқылы коммутациялық шығындарды азайтып, жоғары теориялық тиімділікке қол жеткізу мүмкіндігін көрсетеді.

Талдау барысында дренаждық шың кернеуі, ток пен кернеу толқын пішіндері, жүктеме шарттары және жиілікке тәуелді параметрлер зерттелді. Модельдеу нәтижелері күшейткіштің 3,4-3,8 ГГц диапазонында тұрақты жұмыс істейтінін және жиілік артқан сайын күшейту коэффициенті мен тиімділіктің төмендеу үрдісі байқалатынын көрсетті. Бұл құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен және пассив элементтердің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі. Алынған нәтижелер CMCD қуат күшейткішінің 5G FR1, әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелерінде қолдануға жарамды екенін және болашақта нақты RF транзистор модельдерін (LDMOS/GaN/CMOS) және паразиттік параметрлерді ескеру арқылы практикалық дәлдігін арттыруға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: CMCD, 5G FR1, push-pull архитектурасы, радиожиілікті дроссель, коммутациялық шығындар, дренаждық шың кернеуі, RF модельдеу.

Кіріспе

Байланыс технологиясының қарқынды дамуымен бүкіл әлем бойынша тасымалданатын деректер көлемі айтарлықтай артып келеді [1]. Спектрлік ресурстарды тиімді пайдалану қажеттілігі сымсыз байланыс жүйелерінде жоғары өткізу қабілетін қамтамасыз ететін күрделі модуляция әдістерінің кеңінен қолданылуына әкелді [2-3]. Мұндай сигналдар, әдетте, шыңнан орташаға қатынасы (PAPR) жоғары сигналдар болып табылады, сондықтан оларды күшейту кезінде дәстүрлі қуат күшейткіштері жеткілікті тиімділік көрсете алмайды [4-5]. Осыған байланысты қазіргі заманғы байланыс жүйелері үшін жоғары тиімділікке ие қуат күшейткіш архитектураларын әзірлеу өзекті мәселе болып табылады.

Шығыс қуатының төмендеу аймағында тиімділікті арттыру мақсатында асимметриялық және көп тармақты архитектуралар кеңінен зерттелді [6-7]. Мұндай тәсілдер жүктеме модуляциясын кеңейту арқылы тиімділікті арттыруға мүмкіндік бергенімен, схемалық күрделіліктің өсуіне және белсенді құрылғылардағы қосымша шығындарға әкеледі. Осы бағытта соңғы жылдары кіріс сигналдарының фазасы мен амплитудасын сандық әдістермен басқаруға негізделген қос кірісті Догерти қуат күшейткіштері (ДҚУ) ұсынылды [8-11]. Бұл архитектуралар шығыс қуатының төмендеу резервін (ҚТР) кеңейтуге мүмкіндік береді, алайда

сандық басқару тізбектерінің күрделілігі мен өндірістік шығындардың артуы олардың практикалық қолданылуын шектейді. Мұндай шешімдер 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші, sub-6 GHz) диапазонында, әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелері үшін перспективті болып саналады.

Тиімділікті арттырудың баламалы жолдары симметриялық архитектуралар негізінде де қарастырылған [8-11]. Бұл жұмыстарда жүктеме модуляциясын жетілдіру арқылы тиімді жұмыс аймағын кеңейту мүмкіндігі көрсетілген. Осы тұрғыдан алғанда, тоқтық режимде жұмыс істейтін қуат күшейткіштері кернеулік режимдегі аналогтарымен салыстырғанда дренаждық шың кернеуінің төмендігімен және жоғары теориялық тиімділігімен ерекшеленеді. Мұндай қасиеттер оларды 5G sub-6 ГГц диапазонында, әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелерінде қолдану үшін перспективті етеді.

Қуат күшейткіштері 5G мобильді байланыс жүйелерінің энергия тиімділігін анықтайтын негізгі функционалдық түйіндердің бірі болып табылады. Базалық станциялар мен қолданушы құрылғыларында қуат тұтынуды азайту және жылулық жүктемені төмендету үшін күшейткіштердің жоғары тиімділікпен жұмыс істеуі талап етіледі. Осыған байланысты тоқтық режимде жұмыс істейтін D-класс қуат күшейткіші (CMCD PA) кернеулік режимдегі D-класс күшейткіштерімен (VMCD) салыстырғанда энергия тиімділігі мен коммутациялық режимдегі артықшылықтарымен қызығушылық тудырады.

Осы жұмыстың мақсаты 5G FR1 желілік жағдайларында классикалық push-pull CMCD архитектурасын пайдаланудың тиімділігін талдау және 3,4-3,8 ГГц диапазонында жүргізілген модельдеу нәтижелері негізінде оның жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалау.

Материалдар мен тәсілдер

5G жүйелері әртүрлі жиілік диапазондарын қамтиды. Бұл зерттеу 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші) үшін, нақтырақ айтқанда 3,4-3,8 ГГц диапазонында қуат күшейткішінің тиімділігі мен жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалауға бағытталған. Мұнад сигналды сапалы беру үшін қуат күшейткішінің тиімділігі мен жұмыс тұрақтылығы аса маңызды. CMCD архитектурасы қуат шығынын азайтып, тиімділікті арттыруға көмектеседі. CMCD күшейткіші екі тармақтан тұрады, олардың әрқайсысында радиожиілікті дроссель және NMOS транзисторлары орналасқан. Бұл схема 5G жиіліктерінде тиімді жұмыс істеуге бейімделген.

Токтық режимдегі жұмыс жасайтын қуат күшейткіші, кернеулік режимдегі ток негізінде жұмыс жасайтын қуат күшейткішінің негізгі нұсқасы болып табылады. Оның архитектурасы екі тармақтан тұрады, олардың әрқайсысында радио жиілікті дроссель және NMOS транзисторы бар. Бұл тармақтар орталық жиілікке бапталған RLC дифференциалды желісімен байланысады. Ток негізіндегі қуат күшейткіші идеалды қосқыштық жұмыс принципінің арқасында 100% теориялық тиімділікке қол жеткізе алады. Бұл тиімділік транзисторлардың тек кернеуді немесе тоқты өткізуімен сипатталуына байланысты болады, яғни олар ешқашан екеуін бір уақытта өткізбейді [12-13].

MOSFET транзисторлары кернеуді қосу және ажырату арқылы токтың белгілі бір бағытта ағын қамтамасыз етеді. Радиожиілікті дроссельдер тұрақты ток көздерін қамтамасыз етіп, сигналды жоғары жиіліктен оқшаулайды. Жүктеме желісі (R_L, L_f, C_f) орталық жиілікте ток пен кернеуді синусоидалық формаға түрлендіреді. Бұл схема ток пен кернеу қабаттаспай жұмыс істейтіндіктен, қуаттың ысырабын барынша азайтып, жоғары тиімділікке қол жеткізеді. V_{DD} – күшейткішті тұрақты токпен қамтамасыз ететін негізгі қуат көзі. Токтық режимдегі жұмыс жасайтын қуат күшейткіші схемасы 1 суретте келтірілген.

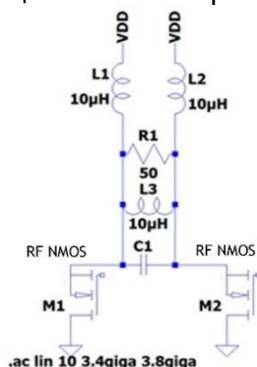
Бұл жұмыста архитектуралық принципті көрсету үшін транзистор идеал қосқышқа жақын модель ретінде қарастырылды; нақты 3,5 ГГц іске асыруда sub-6 ГГц-ке арналған RF транзистор моделі (LDMOS/GaN/CMOS RF) қолданылуы тиіс.

Компоненттік база және модельдеу параметрлері

Бұл жұмыста тоқтық режимдегі Class-D (CMCD) қуат күшейткішінің жұмыс принципі және 5G sub-6 ГГц диапазонындағы жиілікке тәуелді сипаттамаларын бағалау үшін сызбадағы M1 және M2 транзисторлары RF-қосқыштық NMOS моделі ретінде қарастырылды. Зерттеудің мақсаты нақты бір өнеркәсіптік транзистордың паспорттық параметрлерін дәл көшіру емес, CMCD архитектурасының коммутациялық режимдегі жұмысын, ток пен кернеу толқындарының қабаттасуын азайту идеясын және жүктеме желісінің бапталуына байланысты жиілік әсерін көрсету болып табылады. Сондықтан модельдеуде транзисторлар үшін қосу/ажырату процесін сипаттайтын шектеулі параметрлер (ашық күйдегі кедергі,

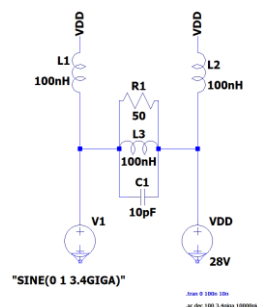
паразиттік сыйымдылықтар және коммутациялық уақыт) ескерілген идеалдандырылған қосқыштық модель қолданылды. Нақты аппараттық іске асыру кезінде 3.4-3.8 ГГц диапазонында жұмыс істеуге арналған RF LDMOS/GaN HEMT немесе CMOS RF құрылғыларын және олардың сызықтық емес (nonlinear) модельдерін пайдалану қажет.

Модельдеу 5G-дің 3.5 ГГц аймағына сәйкес келетін 3.4-3.8 ГГц жиілік диапазонында жүргізілді. Қорек көзі ретінде VDD тұрақты кернеуі қолданылды, ал шығыс жүктемесі $R1=50\ \Omega$ ретінде алынды. Қуат күшейткіштің жүктеме желісі орталық жиілікке бапталған параллель RLC контурымен жүзеге асырылды ($L3$ және $C1$ элементтері). Тұрақты токты беру және радиожиіліктегі сигналдың қорек желісіне өтуін шектеу үшін екі тармақта RFC қызметін атқаратын индуктивтіктер ($L1$ және $L2$) қолданылды. Кіріс басқару сигналдары транзисторларға 180° фазалық ығысумен беріліп, жұмыс циклі 50% болатын қарсы фазалы қоздыру режимі қамтамасыз етілді. Жиілікке тәуелді күшейту мен тиімділік параметрлері AC sweeper режимінде алынып, алынған нәтижелер бойынша жиілік артқан сайын коммутациялық шығындар мен пассивті элементтердің паразиттік параметрлері (ESR/ESL және өзіндік резонанстық жиілік әсері) күшейткіштің сипаттамаларына әсер ететіні талданды.



Сурет 1 – Ток негізіндегі қуат күшейткішінің схемасы

Мұнда M1 және M2 – архитектуралық талдау үшін алынған RF-қосқыштық NMOS модельдері (идеалдандырылған). Нақты sub-6 ГГц іске асыруда RF LDMOS/GaN/CMOS транзисторлары қолданылуы тиіс. Ток негізіндегі қуат күшейткішінің құрылымында транзисторлар қарама-қарсы фазадағы екі шаршы толқынмен басқарылады. Осылайша, бір уақытта тек бір ғана транзистор қосылуы болады. Радиожиілікті дроссельдер тұрақты ток көздері ретінде әрекет ететіндіктен, ток тізбектің бір тармағынан екіншісіне ауысып, RLC желісі арқылы өтеді. Нәтижесінде, токтың шаршы толқын пішініне ие болып, әр тармақта 50% толтыру коэффициенті болады. Сонымен қатар, екі сигнал 180° градусқа фазалық ығысуға ие болады. Бұл жұмыс принципі 2 суретте көрсетілген.



Сурет 2 – Class-D қуат күшейткішіндегі ток ағымы

Нөлдік орташа мәні бар шаршы ток толқыны RLC желісіне беріледі. Бұл ток толқынының уақыттық сипаттамасы Фурье қатары арқылы өрнектеледі. Шаршы толқынның жалпы өрнегі келесідей беріледі:

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{-\infty}^0 i - k e^{jk\theta} + \sum_{-\infty}^0 i - k e^{-jk\theta} = i_k (e^{jk\theta} + e^{-jk\theta}) \quad (1)$$

мұнда $\theta = \omega_0 t$ және $i_k = i_{-k}$, өйткені $i_{RLC}(\theta)$ жұп функция болып табылады. Фурье қатарының бірінші мүшесі былайша өрнектеледі:

$$i_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{-\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^0 d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^0 d\theta \quad (2)$$

бұл $i_0 = 0$ мәніне әкеледі. Сондай-ақ, i_k мәнін келесі түрде есептеуге болады:

$$i_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{-\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^{-jk\theta} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{-I_{peak}}{\omega_0} e^{-jk\theta} d\theta = \frac{8I_{peak}}{\omega_0} \sin\left(\frac{k\pi}{4}\right)^3 \cos\left(\frac{k\pi}{4}\right) \quad (3)$$

Тендеулер 1 және 3 біріктірілгенде, шаршы толқынның формуласы алынады.

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{16I_{peak}}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{4}\right)^3 \cos\left(\frac{k\pi}{4}\right) \cos(k\theta) \quad (4)$$

Оны келесідей қарапайым түрге келтіруге болады.

$$i_{RLC}(\theta) = \sum_{k=odd}^{\infty} \frac{4I_{peak}}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \cos(k\theta) = \frac{4I_{peak}}{\pi} \sum_{k=odd}^{\infty} \frac{1}{k} \cos(k\theta + \varphi_k) \quad (5)$$

мұндағы φ_k келесі мәндерді қабылдайды. $\begin{cases} 0 & k = 1, 5, 9, \dots \\ \pi rad & k = 3, 7, 11, \dots \end{cases}$

RLC параллель желісі негізгі f_c жиілігіне бапталғандықтан, басқа барлық жиіліктерде ол қысқа тұйықталу сияқты әрекет етеді. Осылайша, тек қызығушылық жиілігінде, яғни синусоидалық ток толқыны арқылы R_L -ден ток өтеді. Сондықтан R_L жүктемесінде синусоидалық кернеу толқыны да пайда болады, бұл схеманың әр тармағында жартылай синусоидалық толқын бар екенін білдіреді. Осылайша, жүктеме желісіндегі кернеуді келесідей өрнектейміз.

$$V_{RLC}(\theta) = |I_1| R_L \cos(\theta + \varphi_1) = \frac{4}{\pi} I_p R_L \cos(\theta) \quad (6)$$

Radio Frequency Chokes (Радиожиілік дроссельдері) арқылы кернеу түспеген жағдайда әр тармақта орташа мәні V_{DD} -ға тең жартылай синусоидалық толқын пайда болады, бұл кезде MOSFET транзисторының дренаждық кернеу шыңының мәні πV_{DD} -ге тең болады [13]. Бұл келесі түрде алынады:

$$V_{DD} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_{DS}(\theta)}{\omega} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_{peak} \sin(\theta)}{\omega} d\theta = \frac{V_{peak}}{\omega} \quad (7)$$

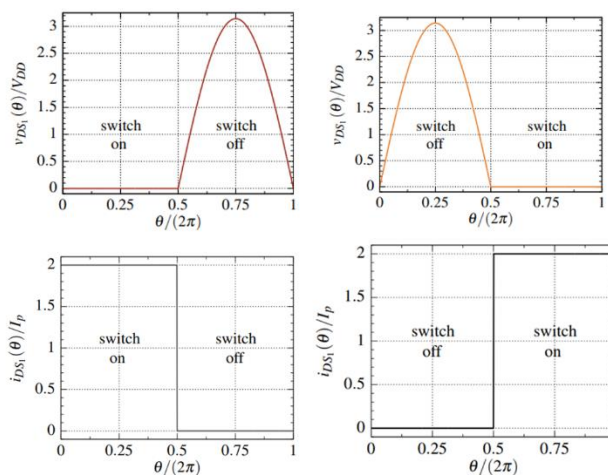
Ток негізіндегі қуат күшейткішінде дренаждық кернеу мен токтың толқын пішіндері әртүрлі сипатқа ие, себебі жүктеме желісі (RLC контуры) орталық жиілікке бапталған. Бұл синусоидалық толқын пішіндерін қалыптастыруға мүмкіндік береді. Осы қарастырып отырған ток негізіндегі қуат күшейткішінің дренаждық шың кернеуі V_{DD} -ға тең болады [10]. Енді қуат күшейткіші үшін толқын пішіндерін көрсете аламыз. Мұны жүзеге асыру үшін дренаждық токтың шың мәнін де есептеу қажет. V_{peak} -тің мәні белгілі болған жағдайда, шыңдық ток мәні келесі формула арқылы анықталады:

$$I_{peak} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{V_{DD}}{R_L} \quad (8)$$

Нәтижелер мен талқылаулар.

Дренаждық кернеу мен токтың шың мәндерін ескере отырып, сондай-ақ жүктеме желісі үшін сапа факторы QLQ_LQL шексіз деп қабылданғанда, әр тармақта дренаждық кернеу жартылай синусоидалық толқын түрінде, ал дренаждық ток 50% жұмыс циклінде (duty cycle) шаршы толқын түрінде болады. Ток негізінде қуат күшейткіші үшін идеал толқын пішіндері 3 суретте көрсетілген.

3 суретте көрсетілген кернеу және ток толқын пішіндері жүктеме желісінің сапа факторы өте үлкен деп қабылданған идеалдандырылған жағдай үшін алынған. Бұл жағдайда RLC жүктеме желісі негізгі гармониканы іріктеп, дренаждық кернеудің жартылай синусоидалық, ал дренаждық токтың 50% жұмыс цикліндегі шаршы толқын пішінінде қалыптасуын қамтамасыз етеді. Нақты практикалық құрылғыларда транзисторлардың сызықтық емес сипаттамалары, коммутациялық уақыттары, сондай-ақ пассивті элементтердің паразиттік сыйымдылықтары мен индуктивтіліктері бұл толқын пішіндерінің бұрмалануына әкелуі мүмкін. Сондықтан көрсетілген толқын пішіндері CMCD қуат күшейткішінің жұмыс принципін және теориялық шектегі тиімділік мүмкіндігін сипаттайды, ал нақты 3.4-3.8 ГГц диапазонындағы жұмыс режимдері келесі бөлімде модельдеу нәтижелері арқылы бағаланады.

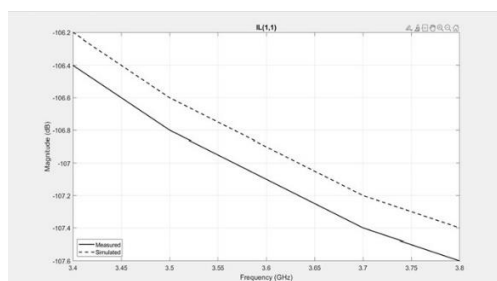


Сурет 3 – CMCD қуат күшейткішінің толқындық пішіндері

(a) 1-ші қосқыштағы кернеу толқын пішіні, (b) 2-ші қосқыштағы кернеу толқын пішіні,
(c) 1-ші қосқыштағы ток толқын пішіні, (d) 2-ші қосқыштағы ток толқын пішіні

Алдыңғы бөлімде қарастырылған кернеу мен токтың идеал толқын пішіндері CMCD қуат күшейткішінің жұмыс принципін және теориялық тиімділік шегін сипаттайды. Алайда нақты жұмыс режимінде күшейткіштің жиілікке тәуелді сипаттамалары транзисторлардың коммутациялық қасиеттеріне, жүктеме желісінің параметрлеріне және пассив элементтердің паразиттік әсерлеріне тәуелді болады. Осы себепті күшейткіштің нақты жұмыс қабілетін бағалау үшін 5G sub-6 ГГц диапазонына сәйкес келетін 3.4-3.8 ГГц аралығында модельдеу жүргізілді.

Күшейткіштің жиілікке тәуелді сипаттамаларын зерттеу үшін 3.4-3.8 ГГц диапазонында модельдеу жүргізілді. Алынған нәтижелер күшейту коэффициентінің (G) және күшейткіштің тиімділігінің жиілікке байланысты өзгерісін көрсетеді. Модельдеу нәтижелері бойынша жиілік артқан сайын, яғни зерттелген диапазонның жоғарғы шегіне жақындаған кезде, күшейту коэффициентінің біртіндеп төмендеуі байқалады (сурет 4).



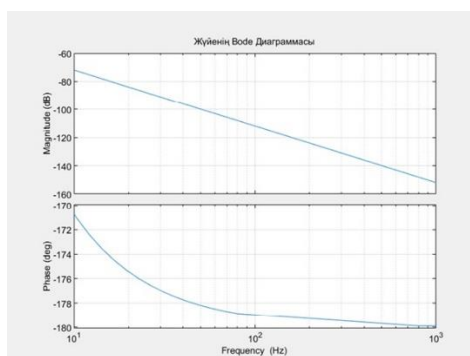
Сурет 4 – Күшейткіштің 3.4 ГГц-тен 3.8 ГГц-ке аралығындағы моделдеуден алынған нәтиже

Тиімділіктің жиілікке тәуелділігін сипаттайтын нүктелі сызық та төмендеу трендін көрсетеді, бұл күшейткіштің 3.4-3.8 ГГц диапазонының жоғарғы бөлігінде салыстырмалы түрде төмен тиімділікпен жұмыс істейтінін білдіреді. Мұндай құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен, сондай-ақ индуктивтілік пен сыйымдылық элементтерінің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі.

Айта кету қажет, берілген нәтижелер идеалдандырылған RF-қосқыштық транзистор моделіне негізделген. Нақты аппараттық іске асыру кезінде транзисторлардың сызықтық емес сипаттамалары мен паразиттік элементтер бұл әсерді күшейтуі мүмкін. Осыған қарамастан, алынған нәтижелер CMCD қуат күшейткішінің 5G sub-6 ГГц, атап айтқанда 3.5 ГГц аймағында жұмыс істейтін радио-жиілікті байланыс жүйелері үшін қолдануға жарамды.

Күшейткіштің жоғары жиілікті (3.4-3.8 ГГц) жұмыс режимдері алдыңғы бөлімде қарастырылды. Сонымен қатар, жүктеме желісінің динамикалық қасиеттерін және токтың амплитуда-фазалық өзгерісінің жалпы үрдісін талдау үшін төмен жиілікті эквиваленттік модель негізінде жиілікке тәуелді сипаттамалар қосымша қарастырылды. Бұл талдау нақты радиожиіліктегі жұмыс режимін тікелей сипаттауға емес, CMCD күшейткішіндегі индуктивті-сыйымдылық элементтердің әсерін сапалық тұрғыдан көрсетуге бағытталған.

5 суретте эквиваленттік жүктеме желісінің төмен жиілікті моделі үшін алынған ток амплитудасы мен фазасының жиілікке тәуелді сипаттамалары көрсетілген. Мұнда жиілік осі герцпен (Гц) берілген, себебі бұл талдау радиожиілікті жұмыс диапазонын тікелей модельдеуге емес, индуктивті және сыйымдылық элементтердің жүйенің фазалық және амплитудалық сипаттамаларына әсерін сапалық тұрғыдан бағалауға арналған.



Сурет 5 – Эквиваленттік жүктеме желісі үшін ток амплитудасы мен фазасының жиілікке тәуелді сипаттамалары (төменжиілікті модель)

Графиктен төмен жиіліктерде ток амплитудасының жоғары мәнге ие болатыны, ал жиілік артқан сайын оның біртіндеп төмендейтіні байқалады, бұл сүзгілеу қасиеттері бар жүктеме желісіне тән құбылыс болып табылады. Фазаның жиілікке байланысты өзгеруі индуктивті элементтердің реактивті әсерімен түсіндіріледі және жүйеде фазалық кешігудің пайда болатынын көрсетеді.

Айта кету қажет, бұл Bode диаграмма 3.4-3.8 ГГц диапазонында алынған нақты модельдеу нәтижелерін алмастырмайды және тек жүктеме желісінің динамикалық қасиеттерін түсіндіру мақсатында келтірілген. Нақты радиожиілікті жұмыс режимдері алдыңғы бөлімде көрсетілген жоғары жиілікті модельдеу нәтижелері арқылы бағаланады.

Қорытынды

Бұл мақалада 5G FR1 (6 ГГц-ден кіші) мобильді жүйелерінде қолдану үшін тоқтық режимдегі D-класс қуат күшейткішінің жұмыс принципі, тиімділігі және жиілікке тәуелді сипаттамалары жан-жақты талданды. Зерттеу жаңа немесе “бірегей” архитектура ұсынуға емес, 5G FR1 желілік жағдайларында классикалық push-pull D-класс қуат күшейткішінің архитектурасын пайдаланудың тиімділігін талдауға бағытталды. Идеал қосқыштық режимде ток пен кернеу толқындарының қабаттаспай жұмыс істеуі теориялық тұрғыдан жоғары тиімділікке (идеал жағдайда 100%-ға дейін) қол жеткізу мүмкіндігін көрсетеді, бұл энергия шығынын азайтуға және жылулық жүктемені төмендетуге негіз болады.

Модельдеу нәтижелері күшейткіштің 3,4-3,8 ГГц диапазонында тұрақты жұмыс істейтінін, ал жиілік артқан сайын күшейту коэффициенті мен тиімділіктің төмендеу үрдісі байқалатынын көрсетті. Бұл құбылыс транзисторлардың коммутациялық шығындарының артуымен және пассив элементтердің паразиттік параметрлерінің әсерімен түсіндіріледі. Сондықтан нақты аппараттық іске асыруда RF транзисторлардың (LDMOS/GaN/CMOS) сызықтық емес модельдерін қолдану, жүктеме желісінің параметрлерін дәл баптау және паразиттік әсерлерді азайту арқылы тиімділікті жақсарту маңызды.

Зерттеудің шектеулері. Бұл зерттеуде 3,5 ГГц жиілік диапазоны үшін идеалдандырылған коммутатор моделін пайдалану нақты транзисторлардың паразиттік реактивті параметрлерін (мысалы, C_{ds} , C_{gd}) толық ескерілмейді. Осыған байланысты алынған нәтижелер және теориялық шектегі тиімділік (идеал жағдайда 100%) архитектураның соңғы практикалық бағасы болып табылмайды және шектік теориялық мүмкіндік ретінде қарастырылуы керек. Құрылғыны практикалық іске асыру 3,4-3,8 ГГц (әсіресе 3,5 ГГц) диапазонына тән коммутациялық шығындарды, паразиттік әсерлерді және нақты құрылғылардың сызықтық емес қасиеттерін есепке алуды талап етеді.

Қорыта айтқанда, тоқтық режимдегі CMCD қуат күшейткіші 5G FR1(6 ГГц-ден кіші), әсіресе 3,5 ГГц аймағында жұмыс істейтін мобильді байланыс жүйелері үшін перспективті шешім болып табылады. Болашақта элементтік базаны және схемалық параметрлерді

оңтайландырумен қатар, нақты RF транзистор модельдерін және паразиттік параметрлерді толық енгізу арқылы оның практикалық қолдану тиімділігін арттыруға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bandwidth Enhancement of Дорепти Power Amplifier Using Modified Load Modulation Network / M. Li et al // IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap. – 2020, № 67. – P. 1824-1834. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2972163>.
2. Boumaiza S. Multispectrum Signal Transmitters: Advances in Broadband High-Efficiency Power Amplifiers for Carrier Aggregated Signals / S. Boumaiza, H. Golestaneh, M.N.A. Abadi // IEEE Microw. Mag. – 2014, № 15. – P. S14-S24. <https://doi.org/10.1109/MMM.2014.2356150>.
3. Akbarpour M. A Transformer-Less Load-Modulated (TLLM) Architecture for Efficient Wideband Power Amplifiers / M. Akbarpour, M. Helaoui, F.A Ghannouchi, // IEEE Trans. Microw. Theory Tech – 2012. – № 60. – P. 2863-2874. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2206050>.
4. Barton, New mixed mode design methodology for high-efficiency out-phasing chireix amplifiers / H.C. Chang et al // IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Pap. – 2019. – № 66. – P. 1594-1607. <https://doi.org/10.1109/tcsi.2018.2882770>.
5. Design of a Broadband High-Efficiency Hybrid Class-EFJ Power Amplifier / Z. Zhang et al // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – vol. 30, № 4. – P. 407-409. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.2973487>.
6. Design of a Post-Matching Asymmetric Дорепти Power Amplifier for Broadband Applications / J. Pang et al // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2015. – № 26. – P. 52-54. <https://doi.org/10.3390/en17092006>.
7. Optimum operation of asymmetrical-cells-based linear Doherty power Amplifiers-uneven power drive and power matching / J. Kim et al // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2005. – № 53. – P. 1802-1809. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.847073>.
8. Fang X.H. Extension of High-Efficiency Range of Doherty Amplifier by Using Complex Combining Load / X.H. Fang, K.-K.M. Cheng // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2014. – № 62. – P. 2038-20. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2333713>.
9. Özen, M. Symmetrical Doherty Power Amplifier with Extended Efficiency Range / M. Özen, K. Andersson, C. Fager // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2016. – № 64. – P. 1273-1284. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2529601>.
10. Fang X.-H. Extended Efficiency Range, Equal-Cell Doherty Amplifier Design Using Explicit Circuit Model / X.-H. Fang, H.-Y. Liu, K.-K.M. Cheng // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2017. – № 27. – P. 1-3. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690870>.
11. Shi W. Extending high-efficiency power range of symmetrical Doherty power amplifiers by taking advantage of peaking stage / W. Shi, S. He, N. Gideon // IET Microw. Antennas Propag. – 2017. – № 11. – P. 1296-1302. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0119>.
12. Hasin M.R. Exploiting Phase for Extended Efficiency Range in Symmetrical Doherty Power Amplifiers / M.R. Hasin, J. Kitchen // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2019. – № 67. – P. 3455-3463. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2921366>.
13. Two-Way Doherty Power Amplifier Efficiency Enhancement by Incorporating Transistors' Nonlinear Phase Distortion / X.-H. Fang et al // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. – 2018. – № 28. – P. 168-170. <https://doi.org/10.1039/D1EE01508G>.

А. Хабай^{1,2}, Е.А. Тулешов^{1*}, Н.Т. Тұрар¹, Ж.Н. Исабеков¹, А.Е. Назырова³

¹Satbayev University,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а

²Алматинский технологический университет,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

10000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

*e-mail: y.tuleshov@satbayev.university

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩЕГО В ТОКОВОМ РЕЖИМЕ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

В данной статье рассматриваются принцип работы, энергетическая эффективность и частотно-зависимые характеристики усилителя мощности класса D в токовом режиме (CMCD),

предназначенного для применения в диапазоне 5G FR1 (ниже 6 ГГц), в частности в полосе 3,4-3,8 ГГц. Усилитель основан на классической push-pull CMCD-архитектуре, работающей в коммутационном режиме, и демонстрирует возможность достижения высокой теоретической эффективности за счёт уменьшения коммутационных потерь благодаря минимизации временного перекрытия токовых и напряженческих форм сигналов.

В ходе анализа исследованы пиковое значение напряжения стока, формы токовых и напряженческих сигналов, условия нагрузки и частотно-зависимые параметры. Результаты моделирования показали, что усилитель стабильно работает в диапазоне 3,4-3,8 ГГц, при этом с ростом частоты наблюдается тенденция к снижению коэффициента усиления и эффективности. Данное явление объясняется увеличением коммутационных потерь транзисторов и влиянием паразитных параметров пассивных элементов. Полученные результаты подтверждают, что усилитель мощности CMCD применим в мобильных системах связи 5G FR1, особенно в области 3,5 ГГц, а в дальнейшем практическую точность можно повысить за счёт использования реалистичных RF-моделей транзисторов (LDMOS/GaN/CMOS) и учёта паразитных параметров.

Ключевые слова: CMCD, 5G FR1, push-pull архитектура, радиочастотный дроссель (RFC), коммутационные потери, пиковое напряжение стока, RF-моделирование.

A. Khabay^{1,2}, E. Tuleshov^{1*}, N. Turar¹, Zh. Issabekov¹, A. Nazyrova³

¹Satbayev University,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a

²Almaty Technological University,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole Bi Street, 100

³L.N. Gumilyov Eurasian National University,

10000, Kazakhstan, Astana, Satpayev str., 2

*e-mail: y.tuleshov@satbayev.university

ANALYSIS OF THE OPERATING EFFICIENCY OF A POWER AMPLIFIER OPERATING IN CURRENT MODE IN 5G MOBILE SYSTEMS

This paper investigates the operating principle, energy efficiency, and frequency-dependent characteristics of a current-mode class-D power amplifier (CMCD) intended for 5G FR1 (sub-6 GHz, below 6 GHz) applications, specifically within the 3.4-3.8 GHz band. The amplifier is based on a classical push-pull CMCD architecture operating in switching mode and demonstrates the potential for high theoretical efficiency by reducing switching losses through minimizing the temporal overlap between current and voltage waveforms.

The analysis examines the peak drain voltage, current and voltage waveforms, load conditions, and frequency-dependent parameters. Simulation results show stable operation across 3.4-3.8 GHz, while indicating a decreasing trend in gain and efficiency as frequency increases. This behavior is attributed to increased transistor switching losses and the impact of parasitic parameters of passive components. The results confirm that the CMCD power amplifier is suitable for 5G FR1 mobile communication systems, particularly around 3.5 GHz, and that practical accuracy can be further improved by employing realistic RF transistor models (LDMOS/GaN/CMOS) and explicitly accounting for parasitic effects

Key words: CMCD, 5G FR1, push-pull architecture, radio-frequency choke (RFC), switching losses, drain peak voltage, RF simulation.

Авторлар туралы мәліметтер

Анар Хабай – PhD, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Еркебулан Амандыкович Тулешов* – техникалық ғылымдар кандидаты, «Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Нұрлыбек Тұрдыбекұлы Тұрар – «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының 1 курс магистранты, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3383-7040>.

Жанібек Назарбекұлы Исабеков – PhD, Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан, z.issabekov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Айжан Есболқызы Назырова – PhD, «Жасанды интеллект технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана қ., Қазақстан, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Информация об авторах

Анар Хабай – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Еркебулан Амандыкович Тулешов* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматизации», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Нурлыбек Турдыбекулы Турар – магистрант 1-го курса кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3383-7040>.

Жанибек Назарбекулы Исабеков – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Робототехники и технических средств автоматизации», Satbayev University, г. Алматы, Казахстан, e-mail: z.issabekov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Айжан Есболовна Назырова – PhD, старший преподаватель кафедры «Технологий искусственного интеллекта», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Information about the authors

Anar Khabai – PhD, Associate Professor of the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.khabay@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-1531>.

Yerkebulan Tuleshov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: y.tuleshov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9146-7137>.

Nurlybek Turar – Master's student at the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurlybek.turar.01@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3383-7040>.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: z.issabekov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Aizhan Nazyrova – PhD, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nazyrova_aye_1@enu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9162-6791>.

Редакцияға енуі 19.09.2025

Өңдеуден кейін түсуі 18.12.2025

Жариялауға қабылданды 19.12.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-2](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-2)

МРНТИ: 49.45.01



**А.Е. Кулакаева¹, А.З. Айтмагамбетов¹, Е.А. Дайнеко^{1,2}, Г.Т. Джаканова¹,
Б.А. Кожакметова^{1,3*}**

¹Международный университет информационных технологий,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, улица Манаса, 34/1

²Satbayev University,

Республика Казахстан, г. Алматы, ул. К. Сатпаева, 22А

³Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1

*e-mail: b.kozhakhmetova@iitu.edu.kz

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ЗВУКОВОГО ВЕЩАНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Аннотация. В данной статье рассматривается необходимость перехода Республики Казахстан к цифровому звуковому вещанию стандарта DRM для модернизации устаревшей аналоговой радиосети и обеспечения равного доступа к информационным ресурсам даже в

©А.Е. Кулакаева, А.З. Айтмагамбетов, Е.А. Дайнеко, Г.Т. Джаканова, Б.А. Кожакметова, 2026