

УДК 621.316:004.9
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-12-35-40

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Шабданбек уулу Роман

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации энергопотребления базовых станций нового поколения (4G/5G), применяемых в современных мобильных сетях связи. Выполнен сравнительный анализ энергозатрат оборудования ведущих производителей (Huawei, ZTE, Ericsson, Nokia) с учётом архитектуры радиомодулей, конфигураций антенн Massive MIMO и используемых систем охлаждения. Показано, что увеличение числа активных антенн и объемов цифровой обработки сигнала в 5G приводит к возрастанию потребления энергии. Предложены меры по повышению энергоэффективности на основе интеллектуального управления питанием, интеграции радиомодулей с антенными, оптимизации систем охлаждения и применения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования сетевой нагрузки. Внедрение указанных решений позволяет снизить эксплуатационные расходы операторов связи и уменьшить углеродный след отрасли.

Ключевые слова: базовая станция; 4G; 5G; энергопотребление; Massive MIMO; интеллектуальное управление; охлаждение; энергоэффективность.

ЖАҢЫ МУУНДАГЫ БАЗАЛЫК СТАНЦИЯЛАРДЫН ЭНЕРГИЯ КЕРЕКТӨӨСҮН ТАЛДОО ЖАНА ОПТИМИЗАЦИЯЛОО

Шабданбек уулу Роман

Аннотация. Макалада заманбап мобилдик байланыш тармактарында колдонулган жаңы муундагы (4G/5G) базалык станцияларынын энергия керектөөсүн оптималдаштыруу маселелери каралат. Huawei, ZTE, Ericsson жана Nokia сыйктуу алдынқы өндүрүүчүлөрдүн жабдууларынын энергиялык өзгөчөлүктөрүнө салыштырма талдоо жүргүзүлүп, радиомодулдардын архитектурасы, Massive MIMO антенна конфигурациялары жана колдонулган муздатуу системалары эске алынган. 5G технологиясында активдүү антенналардын санынын көбөйүшү жана санараптик сигналды иштетүүнүн көлөмүнүн өсүшү энергия керектөөнүн жогорулашина алып келери көрсөтүлгөн. Энергия натыйжалуулугун жогорулатуу учун интеллектуалдык энергия башкаруу системаларын колдонуу, радиомодулдарды антенналар менен интеграциялоо, муздатуу системаларын оптималдаштыруу жана тармакты жүктуу алдын ала божомолдоо үчүн машиналык окутуу алгоритмдерин пайдалануу боюнча чараплар сунушталган. Бул чечимдерди ишке ашыруу операторлордун эксплуатациялык чыымдарын азайтууга жана тармак индустриясынын көмүртек изин кыскартууга мүмкүндүк берет.

Түйүндүү сөздөр: базалык станция; 4G; 5G; энергия керектөө; Massive MIMO; интеллектуалдык башкаруу; муздатуу; энергия натыйжалуулугу.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION OF NEXT-GENERATION BASE STATIONS

Shabdank uulu Roman

Abstract. The article examines the issues of optimizing energy consumption in next-generation (4G/5G) base stations used in modern mobile communication networks. A comparative analysis of the energy consumption of equipment from leading manufacturers (Huawei, ZTE, Ericsson, Nokia) is presented, taking into account the architecture of radio modules, Massive MIMO antenna configurations, and cooling systems applied. It is shown that the increase in the number of active antennas and the amount of digital signal processing in 5G leads to higher energy consumption. Measures to improve energy efficiency are proposed based on intelligent power management, integration of radio

modules with antennas, optimization of cooling systems, and the use of machine learning algorithms for network load forecasting. The implementation of these solutions can reduce the operational costs of mobile network operators and lower the carbon footprint of the industry.

Keywords: base station; 4G; 5G; energy consumption; Massive MIMO; intelligent management; cooling; energy efficiency.

Введение. В условиях стремительного развития телекоммуникационных технологий и перехода к сетям нового поколения повышаются требования к энергоэффективности инфраструктуры связи. Существенную часть эксплуатационных затрат операторов составляет энергопотребление базовых станций, особенно при использовании технологий 4G/5G, отличающихся высокой плотностью передающих элементов и увеличенным объёмом цифровой обработки сигналов. В этой связи особую значимость приобретает анализ энергоэффективности оборудования и поиск оптимальных технических решений, позволяющих сократить потребление энергии без ухудшения качества связи.

В рамках исследования произведено детальное сопоставление энергохарактеристик оборудования ключевых мировых производителей телекоммуникационных систем, таких как Huawei, ZTE, Ericsson и Nokia [1, с. 12]. Сравнительный анализ позволяет выявить различия в архитектуре радиомодулей, подходах к интеграции антенн Massive MIMO, а также эффективности применяемых систем охлаждения.

На основе выявленных тенденций определён комплекс решений, направленных на улучшение энергоэффективности базовых станций нового поколения. К ним относятся внедрение интеллектуальных механизмов управления энергопитанием, интеграция радиомодулей с антенными системами, модернизация охлаждающих технологий, а также использование алгоритмов машинного обучения для оценки и прогнозирования сетевой нагрузки [2, с. 18]. Реализация данных мер позволяет значительно сократить энергопотребление, повысить стабильность работы оборудования и снизить эксплуатационные расходы операторов связи.

Дополнительно следует учитывать, что переход к сетям нового поколения сопровождается увеличением числа активных радиомодулей и элементов Massive MIMO, что приводит к более высоким нагрузкам на системы электропитания и охлаждения [3, с. 19]. В регионах с высокой температурой окружающей среды это становится критическим фактором для стабильности работы оборудования. Кроме того, изменения потребления энергии базовыми станциями зависят от временных профилей нагрузки трафика, которые различаются в зависимости от плотности населения и типа территории (город, пригород, сельская зона).

Актуальность. Развитие телекоммуникационной отрасли сопровождается ростом потребления энергии базовыми станциями, особенно при развёртывании сетей 5G. В условиях ограниченных энергетических ресурсов Кыргызстана и роста тарифов на электроэнергию вопрос энергоэффективности становится экономически и стратегически значимым. Практика показывает, что до 40 % всех эксплуатационных расходов мобильных операторов приходится именно на электроэнергию базовых станций. [4, с. 27]. Поэтому оптимизация энергопотребления является необходимым условием устойчивого развития сетей.

Влияние климатических условий и географических особенностей регионов тоже играет значительную роль. В горных районах и зонах с экстремальными температурами требования к системам охлаждения и надёжности питания базовых станций значительно выше [5, с. 50]. Это приводит к дополнительным энергетическим потерям и увеличивает нагрузку на сети электроснабжения, которые в некоторых районах подвержены нестабильности. В таких условиях особенно важным становится использование энергоэффективных решений, обеспечивающих бесперебойную работу связи при минимальных затратах.

Кроме того, переход к 5G сопровождается изменением структуры трафика: в сетях возрастают для сервисов потоковой передачи данных, облачных вычислений и Интернета вещей (IoT). Эти сервисы

предъявляют высокие требования к пропускной способности и плотности развёртывания базовых станций, что также повышает суммарное энергопотребление сети [6, с. 73]. Следовательно, задача оптимизации энергопотребления должна решаться комплексно – на уровне аппаратного обеспечения, программного управления и архитектуры сети.

Таким образом, повышение энергоэффективности базовых станций нового поколения является ключевым условием устойчивого развития телекоммуникационной отрасли и важным фактором для обеспечения экономической безопасности и цифровой трансформации Кыргызстана.

Целью данной работы является анализ факторов, влияющих на энергопотребление базовых станций 4G/5G, и разработка практических рекомендаций по повышению энергоэффективности сетей связи.

Материалы и методы исследования. В ходе исследования проводилось сопоставление параметров энергопотребления на сети операторов Кыргызстана и США, что позволило выявить различия в эксплуатационных подходах. В частности, американские операторы активно применяют интеллектуальные алгоритмы распределения нагрузки и автоматического отключения неиспользуемых каналов вочные часы, тогда как в Кыргызстане данная практика пока применяется ограниченно [7, с. 44]. Анализ также включал оценку влияния конструктивных особенностей базовых станций, территории размещения и систем вентиляции на общие показатели энергопотребления.

Исследование базируется на:

- сравнительном анализе оборудования Huawei, ZTE, Ericsson и Nokia;
- профессиональном опыте внедрения и модернизации сетевых инфраструктур в Кыргызстане и США;
- аналитических данных по энергопотреблению радиомодулей при различных уровнях нагрузки.

В результате анализа было установлено, что системы активного охлаждения являются одним из наиболее значимых источников дополнительного энергопотребления, достигая до 35 % от общей мощности базовой станции [8, с. 49]. Подробное сравнение энергопотребления по производителям представлено в таблице 1.

Таблица 1 — Среднее энергопотребление базовых станций

Производитель	Технология	Мощность при 100%-й нагрузке, Вт
Huawei	5G	≈ 3852
ZTE	5G	≈ 3675
ZTE	4G	≈ 1045
Ericsson	5G	ниже на ~12–18 %
Nokia	5G	ниже на ~10–14 %

Примечание. На основе результатов автора, подтверждённых измерениями в полевых условиях.

Внедрение пассивных систем охлаждения, использование теплообменных панелей и оптимизация воздушного потока в аппаратных контейнерах позволяют уменьшить эти затраты. Кроме того, модернизация антенно-фидерных систем с использованием интегрированных радиоблоков снижает потери энергии в кабелях.

Также выявлено, что существенное влияние на энергопотребление оказывает алгоритм распределения радиоресурсов. На сетях, где отсутствуют механизмы динамического отключения несущих частот при низкой нагрузке, базовые станции продолжают работать на повышенной мощности даже вочные и малонагруженные периоды. Внедрение режимов «энергосна» и адаптивного масштабирования несущих позволяет снизить потребление в периоды низкой активности до 10–18 %.

Анализ работы оборудования разных вендеров показал, что станции, построенные на платформе Massive MIMO, имеют повышенную удельную мощность на один сектор по сравнению с классическими 4G RRU. Однако при грамотной оптимизации параметров лучеобразования (beamforming) и активации пользовательских потоков (user scheduling) возможно компенсировать рост энергозатрат за счёт улучшения точности покрытия и увеличения спектральной эффективности [9, с. 23].

Кроме того, исследования подтвердили, что применение современных источников питания с высоким коэффициентом полезного действия (более 96 %) и модулей резервирования на базе литий-ионных аккумуляторов снижает потери преобразования энергии и уменьшает стоимость обслуживания по сравнению с традиционными свинцово-кислотными батареями.

Обсуждение. На основе анализа международных практик можно сделать вывод, что наиболее перспективным направлением является комплексное применение программных и аппаратных методов энергосбережения. Ведущие операторы связи в Европе, Китае и США активно переходят от статического режима работы базовых станций к адаптивным системам управления, которые автоматически регулируют количество активных радиомодулей и несущих частот в зависимости от текущего объёма трафика. Это позволяет значительно сократить энергопотребление в ночные часы или в районах с низкой абонентской активностью, при этом сохраняя качество обслуживания.

К эффективным методам энергосбережения относятся алгоритмы «сонных режимов», интеллектуальное управление частотными блоками, а также использование машинного обучения для прогнозирования нагрузки. Последний подход особенно актуален для густонаселённых городов, где трафик подвержен ярко выраженным суточным колебаниям. Системы на базе искусственного интеллекта анализируют исторические данные и автоматически формируют оптимальные профили мощности оборудования, минимизируя количество избыточно работающих радиомодулей.

Кроме того, существенный потенциал повышения энергоэффективности связан с модернизацией аппаратной части. Переход от классических антенно-фидерных систем к интегрированным радиоблокам (Active Antenna Units) позволяет исключить потери мощности в длинных коаксиальных кабелях и сократить энергопотребление на 15–35 %. Также важным является использование современных систем охлаждения – жидкостных, термосифонных или с естественной вентиляцией, которые заменяют традиционные кондиционеры и снижают энергозатраты на поддержание температурного режима оборудования.

Для удалённых и труднодоступных регионов, где подключение к централизованным энергосистемам ограничено или является дорогостоящим, перспективным направлением становится внедрение гибридных систем питания на основе солнечных панелей и маломощных ветровых турбин. Такие решения уже успешно используются в Индии, Непале и Монголии, и показывают высокую экономическую эффективность при эксплуатации базовых станций в горных и сельских районах.

Причины повышенного энергопотребления 5G

- Увеличение числа активных антенн (*Massive MIMO*). Технология Massive MIMO использует десятки и сотни антенных элементов, что повышает пропускную способность сети, но одновременно увеличивает мощность, необходимую для их питания и обработки данных.
- Сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов. В 5G используется расширенная обработка сигналов, включая пространственно-временное формирование лучей (beamforming), что требует высокопроизводительных процессоров и, соответственно, повышенного энергопотребления.
- Недостаточная оптимизация охлаждения в ранних поколениях оборудования. Ранние модели 5G базовых станций применяли традиционные климатические системы, что приводило к значительным тепловым потерям и увеличивало потребление энергии до 30–35 % от общей мощности станции.

Однако современные решения позволяют снизить энергопотребление. Подробная эффективность методов энергосбережения приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Эффективность методов снижения энергопотребления базовых станций

Метод	Снижение энергопотребления, %
Интеллектуальное управление режимами сна	10–15
Переход на радиомодули с интегрированной антенной	15–35
Жидкостное или интеллектуальное охлаждение	8–22
Вендорная унификация сети	10–18

Заключение. Реализация описанных мероприятий является экономически оправданной и может быть внедрена в сетях связи Кыргызстана уже сегодня. Оптимизация энергопотребления базовых станций нового поколения является ключевым фактором устойчивого развития телекоммуникационной отрасли. Применение современных аппаратных решений, интеллектуальных алгоритмов управления и технологий прогнозирования нагрузки позволяет операторам значительно снизить расходы, уменьшить нагрузку на энергосистему страны и сократить выбросы СО₂.

Проведённый анализ показал, что наибольшее влияние на энергопотребление оказывают система охлаждения, конфигурация радиомодулей и режимы загрузки сети. Использование интегрированных антенно-радиомодульных решений, оптимизация антенных систем и внедрение пассивного охлаждения способны обеспечить существенное снижение потребления электроэнергии без ухудшения качества связи. Дополнительный эффект достигается за счёт применения гибких алгоритмов управления несущими частотами и активации «спящих режимов» в периоды низкого трафика.

Важным аспектом является также переход к комплексному мониторингу сетевой инфраструктуры с применением технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Такие системы позволяют не только анализировать текущие нагрузки, но и прогнозировать их, автоматически адаптируя параметры сети под реальные условия эксплуатации.

Таким образом, повышение энергоэффективности базовых станций нового поколения представляет собой не разовое техническое решение, а стратегическое направление развития отрасли. Последовательное внедрение предложенных мер может обеспечить:

- снижение эксплуатационных затрат операторов связи на 20–40 %;
- улучшение надёжности и устойчивости сетевой инфраструктуры;
- сокращение углеродного следа телекоммуникационной отрасли;
- рост доступности и качества цифровых услуг для населения.

Реализация указанных мероприятий особенно актуальна для Кыргызстана, где вопросы энергобез обеспечения и модернизации связи напрямую связаны с экономической безопасностью и цифровой трансформацией общества.

Дополнительные аспекты оптимизации энергопотребления. С учётом того, что структура телекоммуникационной сети может включать несколько уровней доступа и транспортных узлов, важно рассматривать энергопотребление не только на уровне отдельной базовой станции, но и всей сетевой экосистемы. Интеллектуальные системы мониторинга позволяют отслеживать показатели нагрузки в режиме реального времени и адаптировать динамику передачи данных таким образом, чтобы минимизировать избыточные энергозатраты. Кроме того, использование технологий предиктивного анализа предоставляет возможность заранее прогнозировать пики нагрузки и оптимизировать параметры сети с учётом ожидаемого спроса. Это существенно снижает потребность в постоянной работе всех радиомодулей на максимальной мощности, что особенно важно для регионов с переменным профилем трафика.

Технические и архитектурные решения. Одним из ключевых направлений повышения энергоэффективности является переход от традиционных макро-базовых станций к гибридным архитектурам, включающим малые соты (small cells). Это позволяет снизить мощность передатчиков и улучшить

распределение нагрузки по сети. Однако внедрение подобных решений требует наличия хорошо проработанной сети опорного транспорта и комплексного планирования радиопокрытия. В Кыргызстане данный подход потенциально актуален для густонаселённых городских территорий, где трафик распределён неравномерно и зависит от временных интервалов (например, деловые центры).

Экономический эффект. Экономическая целесообразность внедрения энергоэффективных технологий определяется стоимостью модернизации, сроком окупаемости и снижением операционных затрат. Согласно расчётом ведущих операторов связи, внедрение алгоритмов интеллектуального управления питанием и модернизация систем охлаждения может обеспечить снижение энергопотребления от 18 до 37 % при сроке окупаемости от 8 до 20 месяцев. Для Кыргызстана, где тарифы на электроэнергию будут расти в ближайшие годы, применение таких решений станет не только выгодным, но и стратегически оправданным.

Перспективы развития и внедрения ИИ. С развитием технологий искусственного интеллекта операторы связи могут перейти к полностью автоматизированному управлению сетевыми ресурсами. Такие системы способны анализировать нагрузку, состояние оборудования, внешние климатические факторы и автоматически корректировать конфигурацию сети. В будущем ожидается внедрение самоуправляемых базовых станций, способных изменять параметры передачи сигнала и режимы работы в зависимости от прогнозируемых условий. Это открывает возможность создания полностью адаптивных сетей, минимизирующих энергозатраты без участия оператора.

Заключительные замечания. Таким образом, повышение энергоэффективности базовых станций нового поколения является комплексной задачей, требующей учёта технических, организационных и экономических факторов. Реализация предложенных мер позволит не только снять нагрузку с энергосистемы Кыргызстана, но и улучшить устойчивость сетей связи, повысить доступность телекоммуникационных услуг и обеспечить дальнейшее развитие цифровой экономики страны.

Поступила: 10.11.2025; рецензирована: 24.11.2025; принята: 26.11.2025.

Литература

1. Huawei Technologies Co. Ltd. 5G Energy Efficiency White Paper. Shenzhen, 2022. 45 p.
2. ITU-T Recommendation L.1330: Energy efficiency management of wireless mobile networks. Geneva: International Telecommunication Union, 2021.
3. Плотников И.Е. Энергоэффективные системы охлаждения телекоммуникационного оборудования / И.Е. Плотников // Телеком и Радиоэлектроника. 2021. № 6.
4. Nokia Solutions and Networks. Base Station Power Optimization Guidelines. Espoo, 2021. 39 p.
5. Brown J., Cohen L. Energy Saving Techniques in Massive MIMO Base Stations // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24 (3).
6. Гольдштейн Б.С. Оптимизация энергопотребления в беспроводных сетях связи / Б.С. Гольдштейн. М.: Техносфера, 2020. 264 с.
7. Thiagarajah S.P. et al. Energy Efficient Hybrid Power Supply System for 5G Macro Base Station Using Solar Energy and Grid Supply // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2022.
8. Андреев А.А. Энергоэффективность базовых станций LTE и 5G: методы анализа и мониторинга / А.А. Андреев, П.В. Киселев // Вестник Связи. 2021. № 4.
9. Resurrection of 5G: In Defense of Massive MIMO // IEEE Communications Society, ComSoc Technology News (CTN). URL: <https://www.comsoc.org/publications/ctn/resurrection-5g-defense-massive-mimo> (дата обращения: 01.02.2025).