

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Այվազյան Արմեն Գագիկի

ԲԶՁԱՅԻՆ ԿԱՊԻ ՑԱՆՑԵՐԻ ԲԱԶԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ
ԷՆԵՐԳԱԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ե.12.03 - «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2024

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Այվազյան Արմեն Գագիկովիչ


РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ
СОТОВОЙ СВЯЗИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.12.03- "Телекоммуникационные сети, устройства и системы"

ԵՐԵՎԱՆ 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝  տ.գ.դ. Սուրիկ Խաչիկի Խուդավերդյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Հովհաննես Ավագի Գոմցյան
տ.գ.թ. Ահարոն Կամոնի Ահարոնյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի կապի միջոցների
գիտահետազոտական ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2024թ. ապրիլի 12-ին, ժամը 14⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Մեղմագիրն առաքված է 2024թ. մարտի 11-ին:

046 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.  Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении

Научный руководитель: д.т.н. Сурик Хачикович Худавердян

Официальные оппоненты: д.т.н. Оганес Авакович Гомцян
к.т.н. Агарон Камоевич Агаронян

Ведущая организация: Ереванский научно-исследовательский институт средств связи

Защита диссертации состоится 12-го апреля 2024г. в 14⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 046 - "Радиотехники и электроники", действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА) (адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 11-го марта 2024 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046, к.т.н.  Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Энергоэффективность является одной из основных проблем сетей сотовой связи, и ее актуальность возрастает с ростом количества сетевого оборудования, объема передачи данных, расширением спектра предоставляемых услуг, а также широким использованием инновационных технических средств и алгоритмических решений. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи ITU-R M.2083-0 “IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and beyond” энергоэффективность сетей сотовой связи пятого поколения должна быть увеличена, как минимум, на два порядка по сравнению с используемыми сегодня сетями четвертого поколения. Проблема усугубляется тем, что требуемое улучшение всех остальных параметров сетей сотовой связи (скорость передачи данных, пропускная способность, спектральная эффективность, время задержки) уже подразумевает увеличение энергопотребления и снижение энергоэффективности. Для сетей следующего, шестого поколения энергоэффективность станет ключевой задачей, особенно с учетом перспективы крупномасштабного развертывания беспроводной сенсорной сети и плотно распределенных соответствующих датчиков.

Требование повышения энергоэффективности в первую очередь относится к базовым станциям (Base station - BS) сетей сотовой связи, поскольку примерно 60% общего энергопотребления телекоммуникационных систем сотовой связи тратится на их энергоснабжение. Учитывая это обстоятельство, а также продолжающийся рост энергопотребления и увеличение цен на энергоресурсы, тема настоящей диссертационной работы является весьма актуальной. Основным **предметом исследования** являются именно BS и связанные с ними энергетические проблемы. При этом в работе рассматриваются как обычные макро-BS, так и микро-BS с меньшей пропускной способностью и зоной покрытия, а также компактные пико- и фемто-BS еще меньшего размера.

Жесткие требования к энергоэффективности BS современных сетей сотовой связи вызывает необходимость точной и достоверной оценки их энергопотребления, комплексного исследования энергоэффективности, разработки средств по энергосбережению и оптимального использования альтернативных источников энергии. Анализ литературы показывает, что проведенные в этих направлениях исследования являются недостаточными, и необходимы новые расчетные модели, теоретические и экспериментальные оценки, ситуационный анализ и решения, обеспечивающие высокую энергоэффективность BS.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы являются оценка энергопотребления BS современных сетей сотовой связи, исследование и разработка средств для повышения их энергоэффективности, в том числе с использованием систем солнечного электропитания.

Для достижения намеченной цели в работе поставлены следующие задачи:

- разработать обобщенную модель расчета энергопотребления BS и провести соответствующие оценки;
- исследовать энергоэффективность BS в зависимости от их основных рабочих параметров;
- смоделировать для сверхвысокоскоростных сетей сотовой связи энергетические потери на распределительных транспортных (магистральных) линиях;

- провести сравнительный анализ и выбрать энергоэффективные усилители, максимально соответствующие требованиям BS;
- апробировать метод динамического энергосбережения в реальных условиях эксплуатации BS;
- разработать архитектуру и основные принципы проектирования солнечных и солнечно-дизельных систем электропитания BS с оптимальными финансово-техническими показателями.

Научная новизна. В процессе проведения работ получены результаты, отличающиеся новизной:

1. Разработана инженерная модель для расчета энергопотребления BS.
2. Получены аналитические выражения и проанализированы энергетические потери на распределительных транспортных линиях в современных сетях сотовой связи.
3. Предложен алгоритм применения динамического метода энергосбережения в сети сотовой связи.
4. Разработана расчетная модель рационального круглогодичного солнечного электропитания BS.
5. Для условий Армении смоделирована автономная гибридная система электропитания для BS с оптимальными финансово-техническими показателями.

Практическая ценность работы. Результаты исследований и предложенные технические решения могут быть использованы инженерами и специалистами в области связи при проектировании и эксплуатации BS сетей сотовой связи с целью снижения их энергопотребления и повышения энергоэффективности. Научно обоснованные рекомендации по разработке автономных солнечных и солнечно-дизельных систем являются ценным ресурсом для индустрии, позволяя выбирать оптимальные параметры и компоновку систем для конкретных условий.

Полученные в диссертационной работе результаты включены в учебные курсы кафедры «Системы связи» НПУА, а также использованы в учебнике «Электроснабжение телекоммуникационных устройств». Некоторые результаты диссертационной работы включены в научно-прикладной проект «Мониторинг эффективности трансформации энергетической системы Республики Армения из традиционной в возобновляемую» (Комитет по высшему образованию и науке МОНК РА, № 21Т-2Н107, 2021-2024 гг.).

Внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены и в настоящее время успешно используются в сети сотовой связи компании «U-Com» (Ереван, РА). Практическая реализация результатов исследования существенно повысила энергоэффективность BS без ущерба качества предоставляемых услуг. Принципы проектирования автономной солнечной энергосистемы с узлом дистанционного мониторинга были внедрены в производственный процесс Инновационного центра «Барва» (Талин, РА).

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Обобщенная расчетная модель и соответствующие аналитические выражения для оценки энергопотребления BS.
2. Результаты исследования энергопотребления и энергоэффективности BS по отдельным компонентам и в зависимости от рабочих параметров.

3. Средства и решения по обеспечению высокой энергоэффективности BS и сетей сотовой связи.
4. Результаты сравнительного анализа энергоэффективности усилителей по соотношению выходной рабочей и максимальной мощностей.
5. Расчетная модель и процедура проектирования солнечного электропитания для BS.
6. Результаты моделирования и научно обоснованные рекомендации по разработке солнечно-дизельных гибридных систем электропитания для BS.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждена многомерным подходом, который включает в себя тщательные расчетные и сравнительные оценки, применение моделирования, а также проведение экспериментальных исследований. Дополнительное подкрепление достоверности предоставляют акты внедрения.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на:

- XI Международной конференции “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics” (Ереван, Армения, 2017 г.);
- XI и XIII Международных конференциях “Computer Science and Information Technologies” (Ереван, Армения, 2017 и 2021 гг.);
- VII Международной конференции “Возобновляемые и чистые источники энергии” (Ереван, Армения, 2020 г.);
- ежегодных научных конференциях НПУА (Ереван, Армения, 2019 и 2022 гг.);
- XV Международной конференции “Advanced Computational Engineering and Experimenting” (Флоренция, Италия, 2022 г.).

За проведенные исследования был присужден грант победителя от Комитета по высшему образованию и науке МОНКЦ РА в рамках конкурса “Программа содействия исследованиям аспирантов-2022”.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано одиннадцать научных работ, перечень которых представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 163 наименований и актов внедрения результатов работы. Общий объем текста составляет 132 страницы, включая 56 рисунков и 8 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, а также данные об апробации результатов работы и список публикаций.

В первой главе рассмотрены существующие возможности, перспективы и энергетические аспекты развития сотовой связи.

Отмечено, что среди приоритетных задач сетей сотовой связи пятого поколения выделяется задача повышения энергоэффективности базовых станций (BS), особенно в контексте расширения спектра предоставляемых услуг, увеличения объема передачи данных и роста количества сетевого оборудования.

Представлена типичная энергетическая структура BS и рассмотрены ее компоненты. Проведен анализ известных методов оценки энергозатрат BS, в том числе в рамках международных проектов OPERA-Net, Green Radio, EARTH и GreenTouch. Показано, что существующие расчетные модели энергозатрат BS либо не полностью учитывают реальную комплектацию станций, всевозможные энергетические потери и динамический характер нагрузки, либо сложны и трудно применимы для инженерных оценок. Кроме того, на уровне сетей сотовой связи игнорируются энергетические потери на распределительных транспортных (магистральных) линиях.

Приведены ключевые показатели энергоэффективности BS сетей сотовой связи, такие как коэффициент энергопотребления, энергоэффективность, энергопотребление и энергоэффективность зоны покрытия. Обоснована необходимость ситуационного анализа энергоэффективности BS по единому показателю.

Проанализированы два основных и взаимосвязанных направления повышения энергоэффективности BS: сокращение энергопотребления и использование альтернативных источников электроэнергии. Первое из них можно осуществлять путем снижения мощностей усилителей, использования выносных радиоблоков и распределенных антенных систем, а также адаптивного управления ресурсами на основе колебаний трафика. В качестве примера рассмотрен метод динамического (адаптивного) энергосбережения. Эта технология позволяет отключать или переводить в режим энергосбережения отдельные компоненты BS, частоты или предоставляемые услуги.

Использование альтернативных источников электроэнергии особенно актуально для BS, размещенных в труднодоступных и удаленных местах. Отмечена важность разработки принципов проектирования и определения оптимальных параметров солнечных и солнечно-дизельных систем электропитания с учетом особенностей эксплуатации BS, связанных с необходимостью более эффективной генерации электроэнергии и бесперебойного энергоснабжения. Основная трудность – стохастический характер нагрузки BS и генерируемой энергии. При разработке гибридных солнечно-дизельных систем следует максимально учитывать метеорологические и географические показатели, технические характеристики, масштабность и сроки использования, финансово-экономические показатели компонентов систем. Эффективным инструментом учета всех этих факторов и решения многокритериальной оптимизационной задачи является компьютерное моделирование.

В конце первой главы сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке модели расчета и оценке энергопотребления BS и комплексного исследования их энергоэффективности.

На рис. 1 представлена предложенная схема энергопотребления BS, где приведены следующие обозначения: P_{RF} , P_{BB} , P_{PA} , P_{PS} , P_{AC-DC} , P_{DC-DC} - соответственно установочные мощности радиочастотной системы (Radio Frequency System - RF), блока обработки сигнала (BaseBand Unit - BB), усилителя (Power Amplifier - PA), других потребителей постоянного/переменного тока (Power Supply - PS), AC-DC и DC-DC преобразователей; P_{in} и P_{out} – соответственно входная и выходная мощности передачи; N_S и N_{Tx} – соответственно количества секторов и секторных антенн.

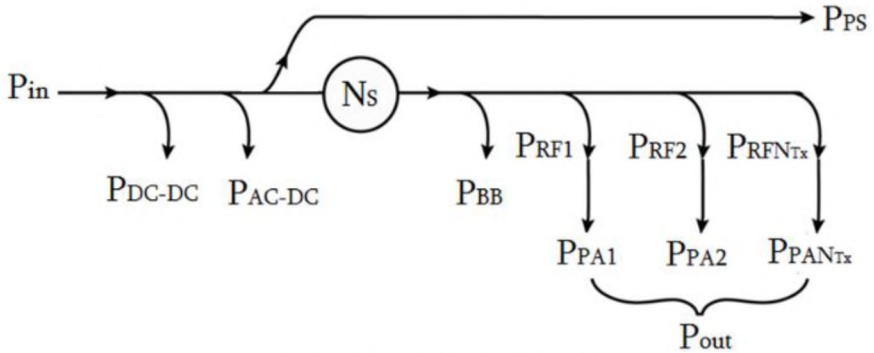


Рис. 1. Схема энергопотребления BS

Предложена расчетная модель оценки энергопотребления BS по установочным (паспортным) значениям мощностей компонентов BS с учетом их коэффициентов полезного действия (КПД), возможных энергетических потерь и динамического характера выходной мощности передачи. Получены следующие аналитические выражения для расчета энергопотребления:

$$P_{BS} = N_S \frac{N_{Tx} P_{PA} + N_{Tx} P_{RF} + f P_{BB}}{(1 - \delta_{MS})(1 - \delta_{CS})} + \frac{P_{AC-DC}}{\eta_{AC-DC}} + \frac{P_{DC-DC}}{\eta_{DC-DC}} + P_{PS};$$

$$P_{PA} = \frac{P_{out}}{\eta_{PA}(1 - \delta_{AI})}; \quad P_{out} = \sum_{n=1}^{N_S N_{Tx}} P_{out,n},$$

где η_{PA} , η_{AC-DC} и η_{DC-DC} – соответственно КПД усилителя и преобразователей ($0 < \eta \leq 1$); δ_{CS} , δ_{AI} и δ_{MS} – соответственно энергетические потери, обусловленные дополнительным локальным охлаждением компонентов (Cooling System - CS) ($0 < \delta \leq 1$), в области антенн (Antenna Interface - AI) и на кабелях и распределительных шинах постоянного тока (Mains Supply - MS); f – количество блоков обработки сигнала в секторе ($f \in \{N_{Tx}, 1\}$); $N_S N_{Tx}$ – общее число антенн в станции.

Модель позволяет проводить ситуационный анализ энергопотребления, включая режимы минимальной и максимальной передачи, простоя, сна, ожидания и полного выключения BS. Определены зависимости энергопотребления BS от выходной мощности передачи и объема трафика. Показано, что они имеют форму линейной функции. Энергопотребление BS в зависимости от загруженности трафика (\aleph) может быть аппроксимировано следующим образом:

$$\begin{cases} P_{BS}(\aleph) = P_1 + \Delta_p P_{out,max}(\aleph - 1) = P_{min} + \aleph \Delta_p P_{out,max}, & \text{когда } 0 < \aleph \leq 1, \\ P_{BS} = P_{sleep}, & \text{когда } \aleph = 0, \end{cases}$$

где $P_1 = P_{min} + \Delta_p P_{max,out}$; Δ_p – коэффициент наклона зависимости энергопотребления от P_{out} ; $P_{out,max}$ – максимальная выходная мощность передачи; P_{min} и P_{sleep} – энергопотребление BS соответственно в режимах минимальной передачи и сна, причем $P_{min} > P_{sleep}$.

Линейность зависимости энергопотребления BS от объема трафика подтверждена результатами многодневных измерений. Результаты мониторинга потребляемого тока (при постоянном напряжении 48 В) и трафика (в относительных единицах) реальной макро-BS за 168 часов представлены на рис. 2. На рис. 3 построена зависимость энергопотребления BS от трафика по данным мониторинга.

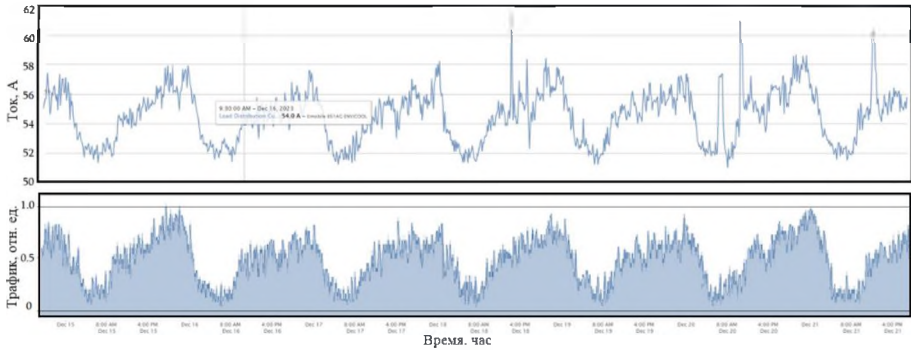


Рис. 2. Результаты мониторинга потребляемого тока и трафика BS за 168 часов

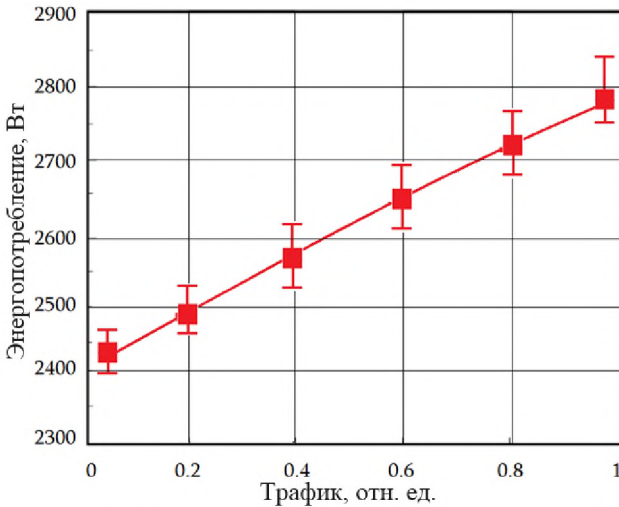


Рис. 3. Зависимость энергопотребления от трафика BS

Проведено сравнение энергопотребления различных BS по отдельным компонентам. В случае макро- и микро-BS основным энергопотребителем является усилитель, в то время как у маломощных BS преобладает энергопотребление блока обработки сигнала (рис. 4). Это объясняется тем, что энергопотребление усилителей обусловлено трафиком, который для пико- и фемто-BS сравнительно невелик. Также проанализирован вклад энергетических потерь в области антенн в общее энергопотребление макро-BS. Показано, что примерно 35% потребляемой мощности

усилителей обусловлено этими потерями, при этом основную часть (95%) составляют потери на фидерах.

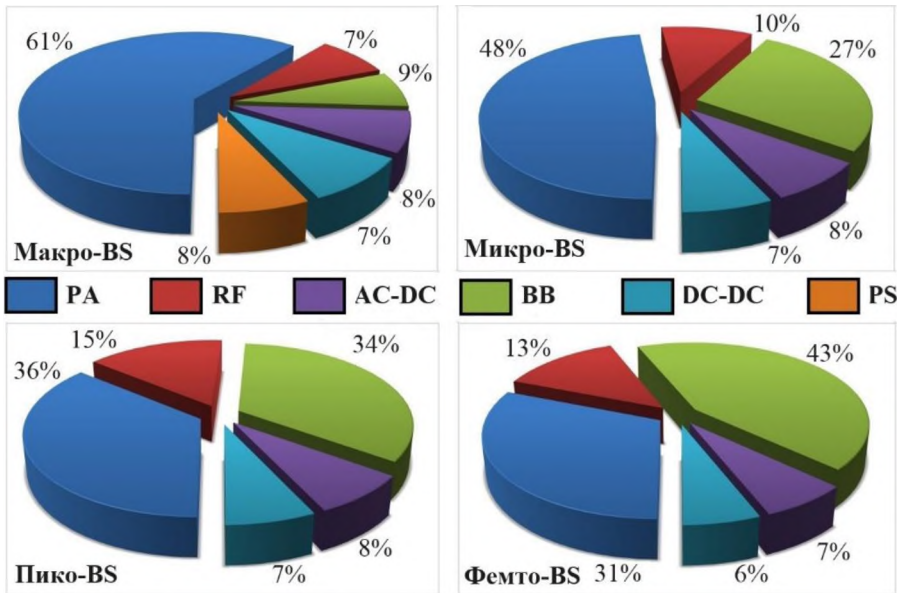


Рис. 4. Энергопотребление BS по отдельным компонентам

Представлены результаты ситуационного анализа энергоэффективности BS по двум показателям: энергоэффективности EE и энергопотребления зоны покрытия APC :

$$EE = R/P_{BS} ; \quad APC = P_{BS}/A_c ,$$

где R - скорость передачи данных; A_c – площадь зоны покрытия.

Чем больше EE и меньше APC , тем более энергоэффективной является BS. Исходя из формулы Шеннона и модели предсказания Окамура-Хата, показано, что эти показатели зависят от значений выходной мощности передачи (P_{out}) и максимального радиуса действия (r) BS, а также от полосы пропускания (Bandwidth - BW) и отношения уровня сигнала к уровню шума (Signal Interference / Noise Ratio - $SINR$). В частности, при $SINR = const$ и расширении BW энергоэффективность возрастает почти линейно. Если BW постоянна, а $SINR$ возрастает, то EE также увеличивается, но этот рост оказывается весьма медленным. APC возрастает с увеличением P_{out} и уменьшением r . С другой стороны, максимальный радиус действия BS является функцией от выходной мощности передачи, следовательно, путем выбора значений P_{out} и r можно обеспечить минимальное значение APC .

Проведен сравнительный анализ энергоэффективности BS сетей сотовой связи с использованием систем SISO (Single Input Single Output) и MIMO (Multiple Input

Multiple Output). Показано, что внедрение системы MIMO приводит к повышению энергоэффективности BS (рис. 5).

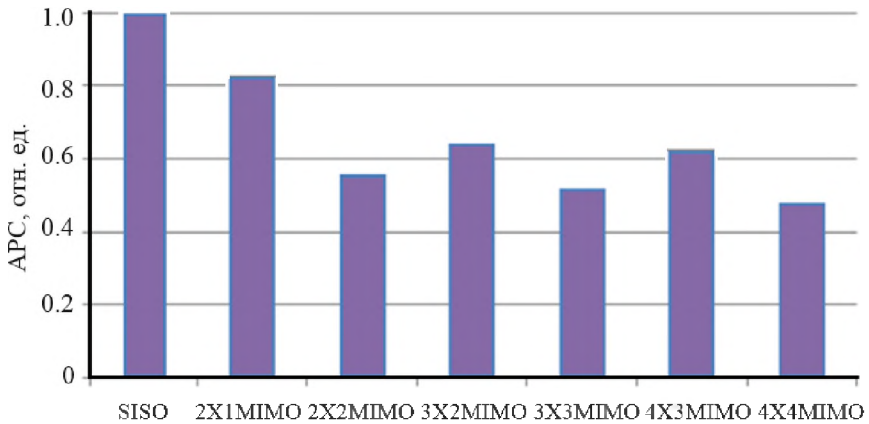


Рис. 5. Энергопотребление зоны покрытия BS с использованием систем SISO и MIMO

В третьей главе представлены результаты исследования и описаны технические средства и решения по повышению энергоэффективности BS и сетей сотовой связи.

Обсуждены принципы построения высокоэффективных усилителей мощности, применяемых в макро-BS. Для сравнения различных типов (линейных А и В, нелинейных G и Догерти) усилителей рассмотрено энергопотребление в зависимости от соотношения выходной рабочей и максимальной (пиковой) мощностей. В этом аспекте обоснована техническая целесообразность использования усилителей Догерти в современных BS и проанализированы схемотехнические, конструктивные и технологические решения по их усовершенствованию. В частности, показано, что реализация метода цифрового предискажения перед подачей радиосигналов на усилитель BS способна повысить не только качество сигнала, но и энергоэффективность за счет расширения зоны покрытия.

Получены аналитические выражения для моделирования энергетических потерь на распределительных транспортных линиях в современных сетях сотовой связи. Общая энергоэффективность сети оценивалась по показателю “энергопотребление зоны покрытия”:

$$APC = \frac{\sum_i^m n_i P_{BS_i} + P_{NT}}{\sum_i^m n_i A_{c_i}},$$

где P_{NT} - энергетические потери на транспортных линиях связи; m - количество типов BS в сети; n_i - количество BS i -го типа.

С применением лицензированной программы Atoll в качестве моделируемых объектов сформированы сети сотовой связи, построенные на макро-BS и макро+микро-BS (гетерогенная сеть). Рассмотрены объекты с одинаковой пропускной способностью и площадью зоны покрытия для двух транспортных линий связи (оптоволоконной и радиоволновой) и при трех топологиях соединения (“дерево”,

“кольцо”, “звезда”). На рис. 6 представлены зависимости APC от пропускной способности сетей сотовой связи без учета и с учетом энергетических потерь на оптоволоконных транспортных линиях. В табл. 1 приведены значения APC для гетерогенных сетей сотовой связи с различными топологиями соединения микроволновых транспортных линий. Результаты моделирования подчеркивают необходимость учета энергетических потерь на транспортных линиях для гетерогенных сетей с высокой пропускной способностью. Исходя из этого, сформулированы практические рекомендации по разворачиванию энергоэффективных сетей сотовой связи.

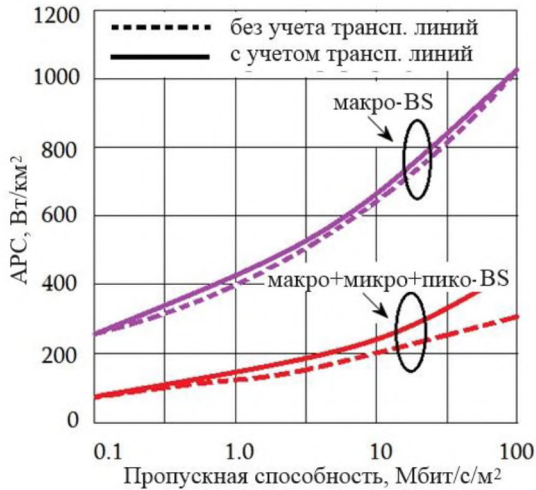


Рис. 6. APC сетей сотовой связи в зависимости от пропускной способности без учета и с учетом энергетических потерь на оптоволоконных транспортных линиях

Таблица 1

APC гетерогенных сетей сотовой связи с различными топологиями радиоволновых транспортных линий, Вт/км²

Пропускная способность, Мбит/с/м²	Без учета трансп. линий	Топология		
		“дерево”	“звезда”	“кольцо”
10	265	304	286	328
100	384	485	457	522

Предложен алгоритм применения режима динамического энергосбережения (Nokia, RAN955), что позволяет в зависимости от загруженности трафика в определенное время отключить определенные ячейки/каналы (Non Remaining Cell) BS связи (рис. 7). Алгоритм апробирован в реальных условиях эксплуатации совмещенной сети сотовой связи. В частности, показано, что в случае трехсекционной и трехканальной BS отключение одного канала снижает энергопотребление на 22%, а в случае двух каналов - на 31% (рис. 8).

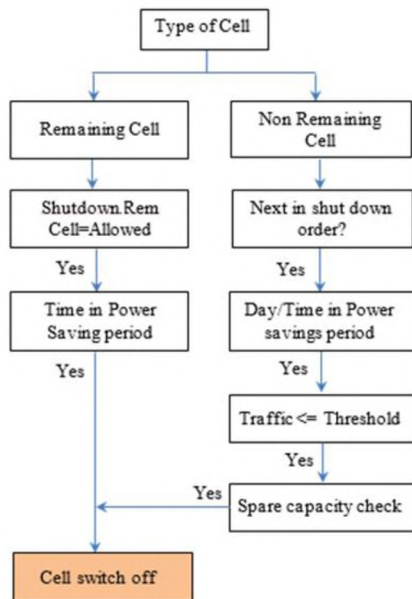


Рис. 7. Алгоритм применения режима динамического энергосбережения

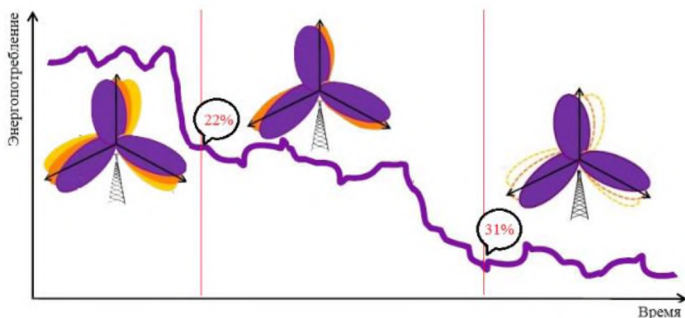


Рис. 8. График снижения энергопотребления БС в режиме динамического энергосбережения

В четвертой главе подробно изучены вопросы проектирования солнечных и солнечно-дизельных систем электропитания для БС.

С учетом особенностей эксплуатации БС предложена общая архитектура гибридной автономной системы электропитания (рис. 9). Основными компонентами системы являются фотовольтаические солнечные модули (PV), дизель-генератор (DG), аккумуляторные батареи (ACB) и узел дистанционного мониторинга (RM). Выработанная энергия стабилизируется и регулируется преобразователем (DC-DC), а процесс электропитания управляется электронным блоком (CB). Сформированное напряжение подается в ACB в режиме зарядки и компонентам БС. При необходимости, частичное (дополнительное) или полное электропитание компонентов БС

осуществляется от DG и/или АСВ в режиме разрядки. Последние также обеспечивают питание RM и СВ. С помощью RM посредством соответствующих датчиков контролируются параметры системы электропитания (выходные ток и напряжение, объем топлива DG, температура и напряжение АСВ), а также отдельные метеорологические характеристики (температура и относительная влажность атмосферы, интенсивность солнечного излучения, скорость ветра). Данные мониторинга передаются управляющему оператору через средства удаленной связи, который, при необходимости, может обратно отправить соответствующие команды.

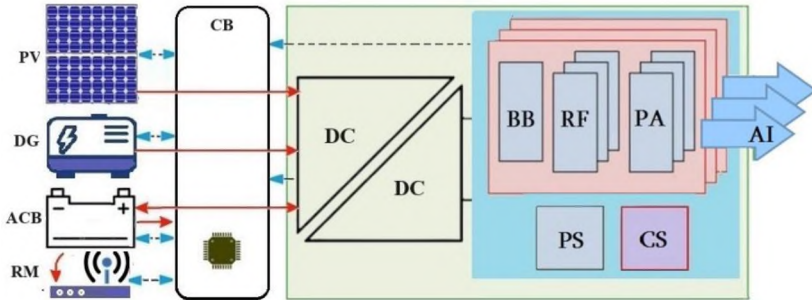


Рис. 9. Архитектура гибридной автономной системы электропитания BS

Предложены процедура проектирования и расчетная модель солнечного электропитания с основным требованием исключения вероятности отключения нагрузки (Loss of Load Probability – LLP) за годовой эксплуатационный период. Расчет установочных мощности PV и емкости АСВ осуществлялся по следующим выражениям:

$$P_{PV} = (k \frac{Q_{STC}}{Q_R} \sum_{i=1}^{24} P_{BS} + \Delta E_{PV}) / 24; \quad C = \frac{T}{V_B \delta_B D} \sum_{i=1}^{24} P_{BS},$$

где Q_{STC} – суточный поток солнечного излучения по стандартным условиям тестирования ($Q_{STC}=1000 \text{ Вт/м}^2$); Q_R – среднесуточный реальный поток солнечного излучения; k – коэффициент потерь; ΔE_{PV} – среднесуточное дополнительное энергопотребление; V_B – номинальное напряжение АСВ; T – продолжительность автономного функционирования АСВ; D – глубина разряда АСВ; V_B – номинальное напряжение АСВ; δ_B – энергоэффективность АСВ.

Согласно расчетной модели, Q_R определяется для наихудшего сезона (месяца) солнечного излучения и при соответствующем оптимальном угле наклона PV:

$$Q_R = Q_{dir} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + Q_{diff} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho(Q_{dir} + Q_{diff}) \frac{(1 - \cos \beta)}{2},$$

где Q_{dir} и Q_{diff} – соответственно среднесуточные потоки прямого и диффузионного солнечного излучения; θ – зенитный угол; β – оптимальный угол наклона PV; ξ – угол между направлением солнечных лучей и нормалью к поверхности PV; ρ – оптическое альbedo Земли.

Спроектирована система солнечного электропитания для BS, изготовлен и протестирован узел дистанционного мониторинга.

С использованием компьютерной программы HOMER-Pro3 исследованы экономические и технические показатели электропитания BS сотовой связи на основе гибридной солнечно-дизельной (PV-DG) системы для условий РА. При моделировании основным требованием было условие $LLP=0$, а искомыми переменными оптимизационной задачи - масштабность и технические характеристики компонентов PV-DG системы. В качестве целевого показателя использовался параметр "чистая приведенная стоимость" (Net Present Value - NPV) электроэнергии:

$$NPV = \sum_t^i \frac{R_t}{(1+i)^t} \rightarrow \min,$$

где R_t –затраты за в течение срока эксплуатации; t – общий срок эксплуатации ($t = 25$ лет); i – ставка дисконтирования.

В качестве примера для оптимизации PV-DG системы рассмотрена конкретная макро-BS (локация с. Цовинар, Гегаркуникский марз, РА) с максимальной потребляемой мощностью 2.9 кВт. При моделировании программа HOMER-Pro3 сгенерировала сотни варианты строения PV-DG систем, результаты десяти из них суммированы в табл. 2. Для рассматриваемой BS, вариант I является наиболее оптимальным по значениям NPV и избытка электроэнергии. В этом случае применяются относительно маломощные PV и CB + DC-DC, удельные стоимости которых (соответственно 250 и 300 \$/кВт) выше, чем удельная стоимость DG (200 \$/кВт). На рис. 10 представлена более подробная информация для варианта I.

Таблица 2

Результаты моделирования гибридных солнечно-дизельных систем

N	PV, кВт	DG, кВт	ACB, кВт·ч	CB+ DC-DC, кВт	NPV, \$	Вклад PV, %	Расход дизтоп-лива, л/год	Стоимость энергии, \$/кВт·ч	Избыток электроэнергии, %
I	4.5	3.0	1.0	4.0	94796	14.7	6187	0.321	14.2
II	5.5	3.0	1.0	6.0	94683	15.4	6139	0.322	19.1
III	7.5	3.0	1.0	7.5	95700	16.5	6064	0.325	24.3
IV	10.0	3.0	1.0	11.0	96789	17.5	6006	0.328	32.1
V	15.0	3.0	1.0	14.0	98496	19.9	5835	0.334	43.7
VI	12.0	3.0	11.0	12.0	79094	37.8	4359	0.268	29.7
VII	15.0	3.0	12.0	15.0	79383	39.0	4275	0.269	36.0
VIII	20.0	3.0	20.0	20.0	8557	46.7	3920	0.277	43.7
IX	26.7	5.0	-	30.0	134590	69.5	5639	0.362	59.9
X	53.1	3.0	150.0	53.5	112796	97.1	212	0.382	67.4

Продемонстрировано, что сочетание DG с PV повышает качество энергоснабжения, сокращает потребление дизельного топлива, решает экологические проблемы. Представлены рекомендации по практической реализации гибридной солнечно-дизельной системы для электропитания BS.

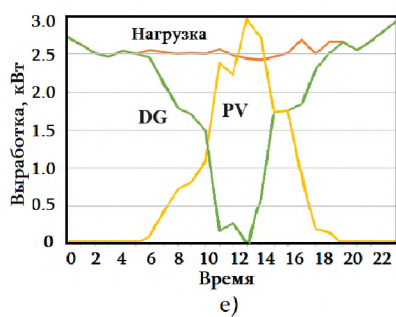
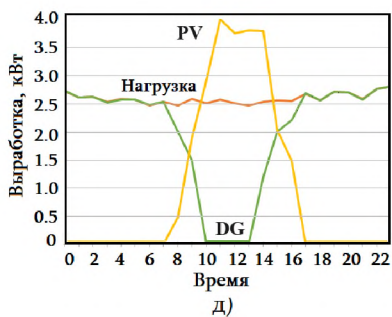
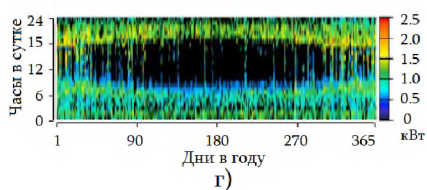
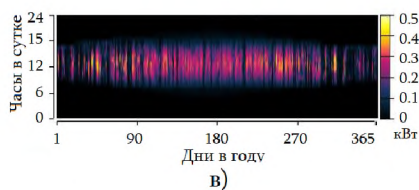
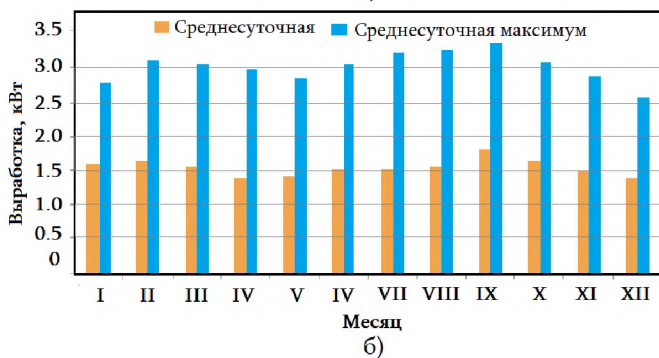
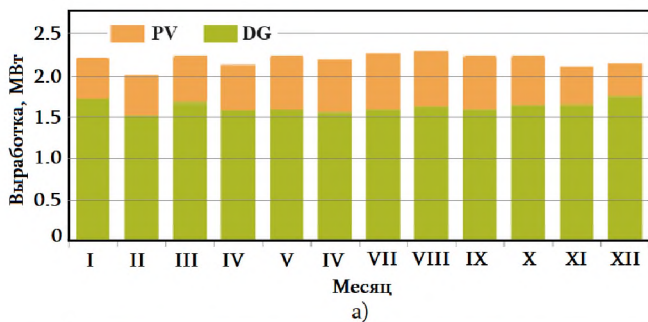


Рис. 10. Выработка электроэнергии для варианта I: месячная (а); среднесуточная для PV по месяцам (б); суточная 2D картина в году для PV (в) и DG (г); суточная в условиях 16 декабря (д) и 16 июля (е)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложена обобщенная расчетная модель оценки энергопотребления BS, учитывающая установочные мощности компонентов, их КПД и динамический характер выходной мощности передачи. Модель позволяет проводить ситуационный анализ энергопотребления в различных режимах работы BS, в том числе при минимальной и максимальной передаче, в режимах простоя, сна, ожидания и полного выключения BS [2].
2. Моделированием и экспериментальным исследованием выявлена линейная зависимость энергопотребления BS от выходной мощности передачи и объема трафика [2].
3. Проведена сравнительная оценка энергопотребления различных типов BS по отдельным компонентам. Установлено, что для макро- и микро-BS основным энергопотребителем является усилитель, а в случае маломощных BS доминирует энергопотребление блока обработки сигнала. Проанализирован вклад энергетических потерь в области антенн в общее энергопотребление макро-BS [2, 4, 9].
4. Исследована энергоэффективность BS в зависимости от их основных рабочих параметров. Показано, что энергоэффективность и энергопотребление зоны покрытия зависят от значений выходной мощности передачи и максимального радиуса действия BS, а также от полосы пропускания и отношения уровня сигнала к уровню шума. Внедрение системы MIMO приводит к повышению энергоэффективности BS [1, 4].
5. Проведена оценка КПД и энергопотребления усилителей разных классов, используемых в BS, в зависимости от соотношения выходной рабочей и максимальной (пиковой) мощностей. Обоснована целесообразность применения усилителей Догерти в современных BS, а также проанализированы схемотехнические, конструктивные и технологические решения по их усовершенствованию [3].
6. Получены аналитические выражения и проведен анализ энергетических потерь на микроволновых и оптоволоконных транспортных линиях с учетом их зависимости от пропускной способности и топологии соединения. Обоснована необходимость учета энергетических потерь на распределительных транспортных линиях для гетерогенных сетей с высокой пропускной способностью. Сформулированы практические рекомендации по развертыванию энергоэффективных сетей сотовой связи [5].
7. Разработан алгоритм применения динамического метода энергосбережения в сети сотовой связи. Испытания в реальных условиях эксплуатации показали, что в зависимости от трафика отключение отдельных каналов BS приводит к снижению энергопотребления до 31% [6, 7].
8. Разработана расчетная модель рационального круглогодичного солнечного электропитания BS, в соответствии с которой оптимальный угол наклона солнечных модулей и суточный поток солнечной радиации определяются для сезона с наименьшим солнечным потенциалом. На основе конкретного примера проектирования установлено, что в условиях РА расчеты следует проводить в январе месяце и при угле наклона солнечных модулей 56° [8, 11].

9. Разработана общая структура солнечно-дизельной системы электропитания для BS. С использованием программного обеспечения HOMER исследованы финансово-технические показатели системы в режиме исключения вероятности отключения нагрузки в течение годового эксплуатационного периода. Представлены научно обоснованные рекомендации по практическому внедрению гибридной автономной системы электропитания [10].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Այվազյան Ա.Գ. MIMO համակարգով բջջային կապի ցանցերի և բազային կայանների էներգաարդյունավետությունը // Հայաստանի ճարտ. ակադեմիայի Լրաբեր. – 2020. - Հ. 17, N 2. – էջ 171-176:
2. Այվազյան Ա.Գ., Խուդավերդյան Ս.Խ. Բջջային կապի ցանցերի բազային կայանների էներգաաձխի գնահատումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. - 2021. - Հ. LXXIV, N 2.- էջ 173-181:
3. Այվազյան Ա.Գ., Խուդավերդյան Ս.Խ. Բազային կայանների ուժեղարարների էներգաաձխի գնահատում // ՀԱՊՀ Լրաբեր. - 2023.- Մաս I.– էջ 248-253:
4. Айвазян А.Г., Худавердян С.Х. Анализ энергоэффективности базовых станций сотовой связи // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2021. - N 1.- С. 94-103.
5. Այվազյան Ա.Գ., Խուդավերդյան Ս.Խ. Բջջային կապի համակարգերի բաշխիչ տրանսպորտային գծերի վրա էներգետիկական կորուստների գնահատումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. - 2022. - Հ. LXXV, N 3.- էջ 389-397:
6. Ayvazyan A.G., Husikyan L.D. Mobile Network Energy Efficiency Improvement by Power Saving Functionality // Proc. 13th Int. Conf. on Comp. Sci. and Inf. Techn. (CSIT). - 2021. - P. 197-198.
7. Ayvazyan A.G. Energy Efficient Algorithms for Base Stations of Cellular Networks // Abstracts Book of 15th Int. Conf. on Adv. Comp. Eng. and Exp.- 2022. - P. 98-99.
8. Այվազյան Ա.Գ. Բջջային կապի բազային կայանների արևային էլեկտրասնուցման համակարգի նախագծում // ՀԱՊՀ Լրաբեր. - 2021. - Մաս II.- էջ 391-395:
9. Ayvazyan A.G. Performance Analyses of Circuit-Switched Fallback // Proc. 11th Int. Conf. on Comp. Sci. and Inf. Techn. (CSIT). - 2017. - P. 379-381.
10. Айвазян А.Г., Костик Н.Р., Тарасов С.А., Худавердян С.Х. Моделирование гибридной солнечной–дизельной системы электропитания базовых станций сотовой связи // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - 2023.- Т. LXXVI, N 1.- С. 30-41.
11. Айвазян А.Г., Агабекян Д.В., Варданян А.А. Солнечное электропитание базовых станций сотовой связи // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2020.- N 2.- С. 107-113.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Էներգաարդյունավետությունը բջջային կապի ցանցերի հիմնական խնդիրներից է, որի կարևորությունն աճում է ցանցային սարքավորումների թվաքանակի և տվյալների հաղորդման ծավալի ավելացմամբ, նոր ծառայությունների ընդգրկմամբ, նորարական տեխնիկական միջոցների ու ավտորիթմական լուծումների լայն կիրառմամբ: Խնդիրն առավել է սրվում այն հանգամանքով, որ բջջային կապի ցանցերի մյուս բոլոր պարամետրերի (տվյալների հաղորդման արագություն, թողունակություն, սպեկտրալ արդյունավետություն, հապաղման ժամանակ) պահանջվող լավարկումն արդեն իսկ ենթադրում է էներգաձախսի աճ և էներգաարդյունավետության նվազում:

Էներգաարդյունավետության բարձրացման պահանջն առաջին հերթին վերաբերում է բջջային ցանցի բազային կայաններին (base station – BS), քանի որ վերջիններս հանդիսանում են հեռահաղորդակցական կապի ցանցերում հիմնական էներգասպառիչները: Դրանց էներգասնուցման վրա ծախսվում է բջջային հեռախոսակապի համակարգի էներգասպառման ողջ ծավալի մոտ 60%-ը: Այդ հանգամանքը, ինչպես նաև էներգառեսուրսների գնի և էներգաձախսի շարունակական աճը BS-ների էներգաարդյունավետության խնդիրը դարձրել են արդիական: Բացի այդ, խնդրի լուծումը կնպաստի նաև բջջային կապի ծառայությունների մատուցման ինքնարժեքի նվազեցմանը:

Ատենախոսության նպատակն էր գնահատել ժամանակակից բջջային կապի ցանցերի BS-ների էներգաձախսը, հետազոտել դրանց էներգաարդյունավետությունը և մշակել բարձր էներգաարդյունավետություն ապահովող լուծումներ և միջոցներ, այդ թվում արևային էներգասնուցման համակարգերի կիրառմամբ

Հետազոտության հիմնական արդյունքները հետևյալն են.

- Առաջարկվել է BS-ների էներգաձախսի գնահատման մոդել, համաձայն որի էներգաձախսը հաշվարկվում է կայանների համալրող տեխնիկական միջոցների դրվածքային (անձնագրային) հզորության արժեքներով հաշվի առնելով դրանց ՕԳԳ-ն և էներգետիկական կորուստները, իսկ որպես պարբերաբար փոփոխվող պարամետր դիտարկվում է կայանի էլքային հզորությունը: Մոդելը հնարավորություն է տալիս իրականացնել BS-ների էներգաձախսի տարբեր իրավիճակային վերլուծություններ, այդ թվում նվազագույն և առավելագույն հաղորդման, պարապ, քնած, սպասման և ամբողջովին անջատման ռեժիմներում:
- Մոդելավորվել և փորձնական հետազոտվել են BS-ների էներգաձախսի կախվածությունները էլքային հաղորդման հզորությունից և թրաֆիկի ծանրաբեռնվածությունից: Ցույց է տրվել, որ կախվածություններն ունեն գծային ֆունկցիայի տեսք:
- Գնահատվել են տարբեր հզորությամբ BS-ների էներգաձախսերն ըստ առանձին համալրող տեխնիկական միջոցների: Մակրո և միկրո կայանների համար հիմնական էներգասպառիչն ուժեղարարն է, իսկ փոքր հզորությամբ (պիկո և ֆեմտո) կայանների դեպքում գերակշռում է թվային ազդանշանի մշակման

սարքավորման ենթագծախար: Վերլուծվել է անտենաների տիրույթում ենթագետիկ ծախսերի ներդրումը macroBS-ների ընդհանուր ենթագծախսում:

- Երկու չափանիշներով հետազոտվել է BS-ների ենթագաարդյունավետությունը՝ կախված հաճախաշերտի թողունակությունից, ազդանշան-աղմուկ հարաբերությունից, ելքային հաղորդման հզորությունից, ընդունիչից հեռավորությունից և տեղանքից: Բջջային կապի ցանցերում MIMO համակարգերի կիրառումը հանգեցնում է BS-ների ինչպես սպասարկման ծածկույթի մակերեսի ենթագծախսի փոքրացմանը, այնպես էլ ենթագաարդյունավետության բարձրացմանը:
- Գնահատվել են BS-ներում կիրառվող տարբեր դասերի ուժեղարարների ՕԳԳ-ն և ենթագծախար կախված ելքային աշխատանքային և առավելագույն հզորությունների հարաբերությունից: Հիմնավորվել է ժամանակակից BS-ներում Դոհերտիի ուժեղարարների կիրառման տեխնիկական նպատակահարմարությունը և վերլուծվել են դրանց լավարկման սխեմատեխնիկական, կառուցվածքային և տեխնոլոգիական լուծումները:
- Արտածվել են անալիտիկ արտահայտություններ և վերլուծվել են բջջային կապի ցանցերում տրանսպորտային օպտիկամանրաթելային և ռադիոալիքային զծերի վրա ենթագետիկական կորուստները՝ կախված ազդանշանների հաղորդման թողունակությունից և զծերի ճարտարապետությունից: Հիմնավորվել է տրանսպորտային զծերով պայմանավորված ենթագետիկական կորուստների հաշվառման անհրաժեշտությունը ժամանակակից գերբարձր թողունակությամբ հետերոգենային բջջային ցանցերի դեպքում: Մշակվել են ենթագաարդյունավետ բջջային կապի ցանցերի տեղակայման գործնական առաջարկություններ:
- Մշակվել է բջջային կապի ցանցում ենթագախնայողության դինամիկ մեթոդի կիրառման ալգորիթմ: Իրական շահագործման պայմաններում փորձարկումները ցույց են տվել, որ կախված թրաֆիկի ծանրաբեռնվածությունից BS-ի թույլատրելի կապուղիների անջատումը հանգեցնում է ենթագծախսի մինչև 31% նվազեցմանը:
- Մշակվել է BS-ների շուրջտարյա ռացիոնալ արևային ենթգասնուցման հաշվարկային մոդել, համաձայն որի PV մարտկոցների թեքության օպտիմալ անկյունը (56°) և արևային ճառագայթման օրական հոսքն որոշվում են ամենացածր արևային ներուժով սեզոնային ժամանակահատվածի (հունվար) դեպքում: ՀՀ պայմանների համար նախագծվել է BS-ի արևային ենթգասնուցման համակարգ:
- Մշակվել է BS-ների դիզեյնային-արևային ենթգասնուցման համակարգի ընդհանուր կառուցվածքը: HOMER համակարգչային ծրագրի միջոցով ուսումնասիրվել են համակարգի ֆինանսական և տեխնիկական ցուցանիշները տարեկան կտրվածքով բեռնվածքի ամբողջական ենթգասնուցման ռեժիմում: Ներկայացվել են էլեկտրաէներգիայի ինքնաշխատ գեներացման համար հիբրիդային համակարգի գործնական ներդրման վերաբերյալ գիտականորեն հիմնավորված առաջարկություններ:

ARMEN GAGIK AYVAZYAN

DEVELOPMENT OF MEANS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF BASE STATIONS IN CELLULAR NETWORKS.

SUMMARY

Energy efficiency is one of the primary challenges in cellular networks, and its relevance increases with the growth of network equipment, data transmission volume, expansion of service offerings, as well as the widespread use of innovative technical means and algorithmic solutions. The problem is exacerbated by the fact that the required improvement of all other parameters in cellular networks (data transmission speed, bandwidth, spectral efficiency, latency) already implies an increase in energy consumption and a decrease in energy efficiency.

The requirement to enhance energy efficiency primarily pertains to base stations (BS) in cellular networks, as approximately 60% of the total energy consumption of telecommunication systems is allocated to their power supply. Considering this circumstance, along with the ongoing increase in energy consumption and rising energy resource prices, the topic of this dissertation is extremely relevant.

The aim of the dissertation is to assess the energy consumption of BS in modern cellular networks, as well as to research and develop means to improve their energy efficiency, including the utilization of solar power systems.

The main results of the research are as follows:

- A generalized computational model for assessing the energy consumption of BS has been proposed. This model takes into account the installation powers of components, their efficiency, and the dynamic nature of the transmission output power. The model enables a situational analysis of energy consumption in various operating modes of BS, including minimum and maximum transmission, idle, sleep, standby, and complete shutdown.
- A linear relationship between the energy consumption of BS, output transmission power, and traffic volume has been identified through modeling and experimental research.
- Comparative evaluation of the energy consumption of different types of BS has been conducted for individual components. It was found that for macro- and micro-BS, the power amplifier is the primary energy consumer, while for low-power BS, baseband unit dominates energy consumption. The contribution of energy losses in the antenna interface to the overall energy consumption of macro-BS has been analyzed.
- The energy efficiency of BS has been investigated based on their fundamental operational parameters. It has been demonstrated that the energy efficiency and area power consumption depend on the values of output transmission power, maximum range of BS, as well as bandwidth and signal interference / noise ratio. The implementation of MIMO systems leads to increased energy efficiency of BS.

- The efficiency and energy consumption of amplifiers of different classes used in BS have been assessed based on the ratio of output operational and maximum (peak) powers. The feasibility of using Doherty amplifiers in modern BS has been justified, and circuitry, structural, and technological solutions for their improvement have been analyzed.
- Analytical expressions and analysis of energy losses in microwave and optical fiber backhaul lines have been obtained, considering their dependence on bandwidth and connection topology. The need to account for energy losses in distribution backhaul lines for high-capacity heterogeneous networks has been justified. Practical recommendations for deploying energy-efficient cellular networks have been formulated.
- An algorithm for implementing dynamic energy-saving methods in cellular networks has been developed. Field tests have shown that, depending on the traffic, disconnecting individual BS channels can reduce energy consumption by up to 31%.
- A computational model for rational year-round solar power supply to BS has been developed. According to this model, the optimal tilt angle of PV modules and daily solar radiation flow are determined for the season with the lowest solar potential. Based on a specific design example, calculations have shown that in the conditions of RA, calculations should be carried out for January with a tilt angle of 56° for PV modules.
- The overall structure of a solar-diesel power system for BS has been developed. Using HOMER software, the financial and technical indicators of the system have been investigated under the condition of load shedding probability exclusion during the annual operational period. Scientifically grounded recommendations for the practical implementation of a hybrid autonomous power system are presented.

