

**СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ -
ЗАПАСАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ НА
БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ**

*Боголюбов Сергей Дмитриевич,
Аскеров Александр Эдуардович*

Аспирант, студент

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

E-mail: 1142240051@rudn.ru, 1132226538@pfur.ru

Научный руководитель — Кочеткова Ирина Андреевна

Развёртывание сетей шестого поколения (6G) предполагает создание гибридных интегрированных сетей, объединяющих космический, воздушный и наземный сегменты. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) рассматриваются как ключевые элементы воздушных платформ в неназемных сетях (Non-Terrestrial Networks, NTN) благодаря мобильности и гибкости развёртывания. Однако автономность БПЛА жёстко ограничена ёмкостью аккумуляторов, а существующие подходы к оптимизации ресурсов, основанные на глубоком обучении с подкреплением, рассматривают энергию как статический параметр. В литературе ощущается дефицит аналитических моделей, исследующих энергетический баланс БПЛА на уровне взаимодействия стохастического потока задач, расхода энергии и стратегий подзарядки.

В работе рассматривается автономный БПЛА, функционирующий как мобильная базовая станция. Аккумулятор дискретизирован на K слотов энергии, каждая задача потребляет один слот, система одновременно обрабатывает до N задач. При достижении критического порога заряда s аппарат прекращает приём заявок и направляется на подзарядку. Цель – разработать модель энергоэффективности в форме системы массового обслуживания с запасами (Queueing-Inventory System, QIS) для аналитической оценки показателей производительности.

Рассмотрим двумерный марковский процесс, состояние которого описывается парой «число задач – уровень заряда». Поступление задач моделируется пуассоновским потоком, время обслуживания и подзарядки распределены экспоненциально. Получены стационарные вероятности.

Численный анализ выполнен для трёх сценариев: операции в удалённой местности с медленной подзарядкой, массовые мероприятия

с высокой нагрузкой и доступом к энергоинфраструктуре, аварийно-спасательные операции с максимальными требованиями к доступности. Получены зависимости вероятности блокировки, среднего числа задач и среднего уровня заряда от порога s . Вероятность блокировки складывается из энергетической и ёмкостной компонент, соотношение которых различается по сценариям. Увеличение порога снижает среднее число задач, но повышает долю времени на подзарядке, формируя компромисс между качеством обслуживания (Quality of Service, QoS) и эффективностью использования энергоресурсов. Перспективным направлением является обобщение на случай нескольких взаимодействующих аппаратов с распределённым управлением.

Литература

1. Pandey G. K., Gurjar D. S., Yadav S., Yuen C. UAV-assisted communications with RF energy harvesting: A comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. Vol. 26, No. 4, P. 2477–2534.
2. Banafaa M., Mohamed E. M., Accumuli K. et al. A comprehensive survey on 5G-and-beyond networks with UAVs: Applications, emerging technologies, regulatory aspects, research trends and challenges // IEEE Access. 2024. Vol. 12, P. 7786–7826.
3. Salini K., Arya P. S., Rangaswamy M. Queueing-inventory systems: A survey // arXiv preprint. 2023. arXiv:2308.06518.
4. Кочеткова И.А., Самуйлов К.Е. Мультисервисные системы с приоритетным обслуживанием трафика. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2025.
5. Аскеров А.Э., Винь Т.Л., Ань Д.Н., Боголюбов С.Д., Власкина А.С., Кочеткова И.А. Базовая модель для анализа энергоэффективности БПЛА в виде системы массового обслуживания – запасания // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2025. – С. 135–138.