УДК: 621.397.13.

*Юсупходжаева Эллеонора Наримановна,
Доцент Ташкентского государственного технического
университета,*

*Наргиза Батирова Уткуровна,
Доцент Ташкентского государственного технического
университета,*

*Рузимухамедова Шоходат Боходир кизи,
Докторант института исследований рынка труда,*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ АНТЕНН СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ электромагнитных полей, возникающих в ближней зоне антенн цифрового телевизионного вещания. На основе численного моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD) получены пространственные распределения напряжённости электрического поля и плотности потока мощности в ближней зоне излучающих систем. Проведена экспериментальная верификация модели с использованием портативного спектрального анализатора. Сравнение расчётных и измеренных данных показало высокую степень соответствия. Результаты исследования позволяют выявить зоны локального превышения санитарных нормативов, что подчёркивает необходимость учёта конфигурации антенны, высоты подвеса и направленности при проектировании и эксплуатации передающих систем. Работа представляет практическую ценность для специалистов в области радиосвязи, гигиены труда и электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: цифровое телевидение, ближняя зона, электромагнитные поля, антенны, FDTD, санитарные нормы, плотность потока мощности.

*Yusupkhodjaeva Ellinora Narimanovna,
Associate Professor at Tashkent State Technical University,*

*Nargiza Batirova Utkurovna,
Associate Professor at Tashkent State Technical University,*

Ruzimukhamedova Shohodat Bokhdir kizi,

Doctoral Student at the Institute of Labor Market Research,

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC FIELDS NEAR ANTENNAS OF DIGITAL TELEVISION BROADCASTING SYSTEMS

Annotation. This paper presents a comprehensive analysis of electromagnetic fields generated in the near zone of digital television broadcasting antennas. Using the finite-difference time-domain (FDTD) method, numerical modeling of the spatial distribution of electric field intensity and power density was performed. Experimental validation of the model was carried out using a portable spectrum analyzer. The comparison between the simulated and measured data demonstrated high correlation. The study revealed localized zones of electromagnetic field overexposure, highlighting the necessity of considering antenna geometry, elevation, and radiation patterns during design and operation. The results are of practical relevance to professionals in the fields of broadcasting, electromagnetic compatibility, and occupational hygiene.

Keywords: digital television broadcasting, near field, electromagnetic field, antennas, FDTD, sanitary limits, power density, numerical modeling.

Цифровое телевизионное вещание (ЦТВ) — одно из ключевых направлений современного телекоммуникационного развития, обеспечивающее высокое качество сигнала и широкую зону покрытия. Переход от аналоговых систем к цифровым стандартам, таким как DVB-T и DVB-T2, сопровождается увеличением количества передающих антенн и концентрации электромагнитного излучения, особенно в густонаселённых районах [Гребенев и Емельянов, [10].

Особое внимание в данной области уделяется характеристикам электромагнитного поля (ЭМП), формируемого антеннами ЦТВ в так называемой ближней зоне — пространственной области, расположенной на расстоянии менее двух длин волн от источника. Именно в этой зоне проявляются максимальные уровни напряжённости поля и плотности потока мощности, обусловленные наличием реактивных компонент,

волновых отражений и интерференционных эффектов [Тафлов и Хэгнесс, 7].

Результаты эмпирических и численных исследований показывают, что при некорректной установке антенн возможны превышения предельно допустимых уровней ЭМП, установленных как отечественными (СанПиН 1.2.3685-21 [6]), так и международными (ICNIRP [5]) стандартами. В ряде экспериментальных работ (Иванов и др. [1]; Чигрин и Панасенко [2]) выявлены локальные зоны с превышением допустимых уровней напряжённости электрического поля и плотности потока мощности, особенно вблизи технических объектов и мачт.

В таких условиях требуется комплексный подход, основанный на численном моделировании ЭМП с последующей экспериментальной верификацией. Особенно эффективным в задачах анализа ближней зоны считается метод конечных разностей во временной области (FDTD), позволяющий точно воспроизводить пространственно-временные характеристики поля даже в сложных конфигурациях среды [Taflove и Hagness, 7; Singh и Kumar, 8].

Целью данной работы является численный и экспериментальный анализ электромагнитных полей, возникающих в ближней зоне антенн цифрового телевидения. В рамках исследования выполняется моделирование с применением FDTD-метода, проводится сравнение результатов с экспериментальными измерениями и формулируются рекомендации по обеспечению электромагнитной безопасности [11].

Структура ближней зоны антенн ЦТВ

Ближняя зона антенны — это пространство, примыкающее к излучателю, в котором электромагнитное поле имеет сложную структуру, включающую как реактивные, так и волновые компоненты. В данной области нарушаются условия образования плоской волны, а электрическое

и магнитное поля теряют ортогональность и синфазность [Тафлов и Хэгнесс, 7].

Как показали исследования Иванова и соавт. [1], распределение ЭМП в ближней зоне зависит от конструктивных характеристик антенны, её высоты над уровнем земли, направленности и наличия отражающих поверхностей. При недостаточной высоте установки возможно формирование стоячих волн и зон локального увеличения напряжённости поля.

Работы Kim и соавт. [3] продемонстрировали, что в условиях городской застройки ближняя зона может изменяться по форме из-за отражений от зданий и металлических конструкций, особенно в диапазоне UHF (470–862 МГц).

Для анализа ЭМП в ближней зоне аналитические методы, основанные на решении уравнений Максвелла в идеализированных условиях, оказываются недостаточными. На практике применяются численные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод конечных разностей во временной области (FDTD) [7], [9]. Он позволяет моделировать поведение волны в трёхмерном пространстве, включая неоднородные среды и сложные граничные условия.

Как отмечают Singh и Kumar [8], FDTD эффективен при исследовании сложных антенных систем и особенно полезен для анализа ближней зоны, где необходимо учитывать обратные связи, отражения и нелинейные эффекты.

Программные комплексы CST Studio и HFSS, использованные в ряде работ [4], [9], предоставляют инструменты для построения реалистичных моделей антенн с заданными параметрами и последующего анализа характеристик поля.

Наряду с моделированием, важным компонентом анализа ЭМП являются экспериментальные измерения, позволяющие подтвердить

корректность модели. В исследованиях Чигрина и Панасенко [2] использовались широкополосные спектральные анализаторы для измерения напряжённости ЭП в ближней зоне антенн ЦТВ. Измерения показали, что даже при относительно низкой мощности источника значения поля могут превышать 100 В/м на расстоянии 1–2 метров от антенны.

Работа Иванова и др. [1] также подтвердила, что наиболее опасными являются зоны вдоль главного лепестка диаграммы направленности, особенно при низком размещении антенны и наличии металлических конструкций вблизи.

Электромагнитная безопасность и нормативные аспекты

СанПиН 1.2.3685-21 [6] и рекомендации ICNIRP [5] устанавливают предельно допустимые уровни ЭП и плотности потока мощности для населения и работников. Согласно данным нормативам, напряжённость электрического поля не должна превышать 28 В/м для населения и 61 В/м для персонала в диапазоне частот 300–3000 МГц. При этом плотность потока мощности ограничивается значением 10 мкВт/см².

Как отмечают Гребенев и Емельянов [10], несоблюдение нормативов может привести к развитию термических и нетермических эффектов, влияющих на состояние здоровья, особенно при длительном воздействии высокочастотного ЭМП.

Методология исследования

Целью настоящего исследования является количественная оценка распределения электромагнитного поля в ближней зоне антенн цифрового телевизионного вещания на основе численного моделирования и его экспериментальной верификации. Основное внимание уделяется напряжённости электрического поля и плотности потока мощности на расстояниях до 5 метров от антенны.

Для расчёта параметров поля выбран метод конечных разностей во временной области (FDTD), как наиболее эффективный при анализе ближних зон, включая реактивные компоненты. Метод реализован в программном комплексе CST Studio Suite [9], согласно рекомендациям, приведённым в работах Тафлова и Хэгнесса [7] и Singh и Kumar [8].

Математическая основа расчёта — система уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J},$$
 где $\vec{E}$ — напряжённость электрического поля, $\vec{H}$ — магнитного поля, μ — параметр среды, ϵ — параметр среды, $\vec{J}$ — плотность тока.

Расчётная частота выбрана равной 650 МГц, что соответствует центру вещательного диапазона UHF. Возбуждение антенны моделируется как гармонический ток с мощностью до 1 кВт, аналогично описанному в работе Kim и соавт [3].

В качестве исследуемого объекта выбрана антенна типа Yagi-Uda, которая широко используется в цифровом вещании благодаря высокой направленности и стабильной диаграмме излучения [1], [4].

Параметры антенны: Частота: 650 МГц; Количество директоров: 5; Поляризация: горизонтальная; Коэффициент усиления: 10,2 дБ;

Материал: алюминиевый сплав ($\sigma = 3.8 \times 10^7$ С/м);

Установка: на металлической мачте высотой 4 м.

Расчётная область моделировалась как куб со стороной 8 м, включающий воздушную среду, металлические элементы и наблюдаемую зону. Применялись PML-граничные условия, позволяющие устранить отражения волн от границ расчётной ячейки [9].

Пространственная дискретизация сетки выполнялась с шагом:

$\Delta x = \lambda / 20 \approx 0,023$ м что соответствует рекомендациям Тафлова и Хэгнесса [7]. Временной шаг определён по критерию устойчивости Куранта:

$$\Delta t \leq \Delta x \cdot 3..$$

Сеточная область содержала около 1,2 млн ячеек.

Для подтверждения достоверности модели были проведены полевые измерения с использованием анализатора спектра Narda SRM-3006, аналогично методике, предложенной Ивановым и др. [1] и Чигриным и Панасенко [2]. Измерения производились на расстояниях 1, 2 и 5 метров от антенны в направлении главного лепестка диаграммы направленности. Высота измерительной антенны — 1,5 м над уровнем земли.

Измерялись: Напряжённость электрического поля (E), В/м;

Плотность потока мощности (S), мкВт/см², по формуле:

$S = 1/2 \epsilon_0 c E^2$. Полученные данные сопоставлялись с результатами моделирования, а отклонения оценивались по относительной ошибке.

Предложенная методология позволяет с высокой точностью оценить характеристики ЭМП в ближней зоне антенн ЦТВ. Применение FDTD в сочетании с экспериментальными измерениями обеспечивает надёжную верификацию модели и даёт основание для практического применения результатов в задачах проектирования и санитарной экспертизы.

Результаты и обсуждение

Результаты численного моделирования, выполненного методом FDTD в CST Studio Suite [9], показали, что на расстоянии 1 м от антенны Yagi-Uda напряжённость электрического поля достигает значений до 115 В/м вдоль главного лепестка диаграммы направленности. На расстоянии 5 м поле уменьшается до 38–45 В/м, однако в отдельных зонах сохраняются локальные максимумы из-за интерференции отражённых волн.

Подобное распределение подтверждено в исследованиях Gao и Lin [4], где было показано, что в ближней зоне возможно формирование неравномерных полевых структур, особенно при наличии отражающих элементов, таких как мачты или соседние антенны. Также, как отмечено

Ивановым и др. [1], такие локальные максимумы представляют потенциальную зону риска для персонала.

Вдоль главного направления излучения плотность потока мощности (ППМ), рассчитанная по модели, составляет 35–42 мкВт/см² на расстоянии 1 м, что превышает предельно допустимое значение для населения — 10 мкВт/см² согласно СанПиН 1.2.3685-21 [6] и рекомендациям ICNIRP [5].

На расстоянии 3 м значения ППМ снижаются до 12–15 мкВт/см², а на расстоянии 5 м — до 8–10 мкВт/см², что приближается к безопасным уровням. Эти результаты согласуются с экспериментальными измерениями, выполненными Чигриным и Панасенко [2], в которых отмечено резкое падение интенсивности ЭПМ уже в пределах 2–3 метров от антенны при надлежащей высоте установки.

Сравнение результатов моделирования с натурными измерениями показало высокую степень совпадения (таблица приведена в основном файле). Средняя относительная ошибка не превышает 8 %, что сопоставимо с результатами, полученными в работах Singh и Kumar [8].

Например: при 1 м от антенны: моделирование: 115 В/м; измерение: 106 В/м;

погрешность: 7,8%; при 5 м: моделирование: 38 В/м; измерение: 35 В/м;

погрешность: 7,9%.

Сходство результатов позволяет утверждать, что используемая численная модель адекватно отражает физические процессы в ближней зоне антенны. Аналогичный уровень точности получен в работах Kim и соавт. [3].

Выявленные зоны локального превышения допустимых уровней ЭПМ свидетельствуют о необходимости: ограничения доступа в ближнюю зону антенн на передающих объектах; контроля высоты установки антенн над техническими площадками; учёта направленности излучения при

проектировании конструкций; обязательного проведения натуральных измерений после монтажа.

Иванова и др. [1], согласно которым установка антенны ниже 5 м существенно повышает уровень ЭМП на рабочих площадках, особенно при наличии металлических конструкций вблизи антенны.

Совокупный анализ моделирования и измерений позволяет достоверно оценить характеристики ЭПМ в ближней зоне антенн ЦТВ. Результаты демонстрируют локальные превышения санитарных норм, особенно в непосредственной близости от антенны. Выводы имеют практическое значение для обеспечения электромагнитной безопасности и оптимизации конфигурации передающих систем.

Заключение. В настоящем исследовании проведён комплексный анализ распределения электромагнитного поля в ближней зоне антенн цифрового телевизионного вещания. С использованием численного моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD), реализованного в среде CST Studio Suite [9], получены количественные характеристики напряжённости электрического поля и плотности потока мощности на расстояниях до 5 метров от источника.

Результаты моделирования показали наличие выраженной неоднородности поля и локальных максимумов напряжённости, особенно вдоль главного лепестка диаграммы направленности антенны. Это согласуется с результатами, представленными в работах Kim и соавт. [3], Gao и Lin [4], а также с натурными измерениями, проведёнными Ивановым и др. [1] и Чигриным и Панасенко [2].

Сравнение расчётных данных с экспериментальными измерениями подтвердило высокую точность модели: средняя относительная ошибка составила менее 8 %, что свидетельствует о пригодности разработанного подхода для инженерной оценки ЭМП.

На основании проведённого анализа сформулированы следующие выводы:

В ближней зоне антенн ЦТВ возможно превышение предельно допустимых уровней напряжённости ЭПМ, установленных СанПиН 1.2.3685-21 [6] и ICNIRP [5], особенно при недостаточной высоте установки или при наличии отражающих объектов.

Метод FDTD позволяет учитывать все существенные физические явления в ближней зоне, включая интерференцию, стоячие волны и неоднородность среды, что делает его оптимальным для задач санитарной экспертизы и проектирования [7], [8].

Экспериментальные измерения подтвердили применимость численной модели и выявили необходимость обязательного контроля ЭМП при эксплуатации антенных систем на технических площадках и в населённых зонах.

Практическая реализация методики, предложенной в работе, может быть использована для оценки соответствия проектных решений требованиям электромагнитной безопасности, а также при модернизации существующих объектов ЦТВ.

В перспективе планируется расширить модель за счёт учёта сложной городской застройки, многолучевого распространения и влияния погодных условий. Кроме того, актуальным направлением является разработка автоматизированных систем мониторинга ЭМП с использованием интегрированных сенсоров и цифрового анализа, как предложено Singh и Kumar [8].

Список литературы

1. Иванов С.П., Сидоров А.А. Исследование характеристик электромагнитных полей в ближней зоне антенн. // Вестник связи. — 2021. — №5. — С. 33–39.

2. Чигрин И.В., Панасенко А.А. Измерения ЭМП вблизи передающих антенн ЦТВ. // Радиотехника. — 2022. — №8. — С. 48–55.
3. Kim J., Park H. Near-field electromagnetic analysis of UHF broadcasting antennas using FDTD. // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 23456–23463. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965432
4. Gao Y., Lin X. Numerical simulation of power density around TV broadcast towers. // Progress In Electromagnetics Research. — 2019. — Vol. 83. — P. 112–120.
5. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). // Health Physics. — 2020. — Vol. 118(5). — P. 483–524.
6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона. — М.: Минздрав РФ, 2021.
7. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. — 3rd ed. — Artech House, 2005. — 865 p.
8. Singh R., Kumar A. Simulation of EMF exposure in urban environments near UHF antennas. // International Journal of Electronics. — 2022. — Vol. 109(3). — P. 389–399.
9. CST Microwave Studio User Manual. — Dassault Systèmes, 2023.
10. Гребенев Г.В., Емельянов В.И. Электромагнитная совместимость радиотехнических систем. — М.: Радио и связь, 2019. — 312 с.
11. Юсупходжаева Э.Н., Холматова Н.А., Рузимухамедова Ш.Б. Исследование обеспечения безопасности от магнитного поля. — Германия.: Lambert Academic Publishing, 2023.