

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ-БЕЗОПАСНОЙ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

*Бондаренко О.В., Степанова Л.И.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[vols@onat.edu.ua](mailto:vols@onat.edu.ua)*

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ БІОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНОЇ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ ЗОНИ ВИПРОМІНЮВАННЯ АНТЕНИ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

*Бондаренко О.В., Степанова Л.И.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[vols@onat.edu.ua](mailto:vols@onat.edu.ua)*

**IMPROVING THE METHOD OF DETERMINATION THE BIOLOGICAL-SAFE ZONE OF ANTENNA RADIATION FOR MOBILE COMMUNICATION BASE STATIONS**

*Bondarenko O.V., Stepanova L.I.*

*Odessa national O.S. Popov academy of telecommunications,  
1 Kuznecha st., Odessa, 65029, Ukraine.  
[vols@onat.edu.ua](mailto:vols@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** В работе усовершенствована методика определения биологически-безопасной для населения зоны излучения на примере широко используемой в настоящее время антенны базовой станции мобильной связи KATHREIN 739632 за счет определения и учета всех составляющих векторов напряженности электрического и магнитного полей. Выполнен расчет границ санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вблизи антенны базовых станций мобильной связи путем визуализации структуры ближнего поля антенны с помощью программы MathCad 14 version и программного пакета Feko.

**Ключевые слова:** антенна базовой станции мобильной связи, санитарно-защитная зона, зона ограничения застройки, вектор Пойнтинга, векторы напряженности электрического и магнитного полей.

**Анотація.** В роботі удосконалено методику визначення біологічно-безпечної для населення зони випромінювання на прикладі значно використовуваної в даний час антени базової станції мобільного зв'язку KATHREIN 739632 за рахунок визначення й урахування всіх складових векторів напруженості електричного і магнітного полів. Виконано розрахунок меж санітарно-захисних зон і зон обмеження забудови поблизу антени базових станцій мобільного зв'язку шляхом візуалізації структури ближнього поля антени за допомогою програми MathCad 14 version і програмного пакета Feko.

**Ключові слова:** антена базової станції мобільного зв'язку, санітарно-захисна зона, зона обмеження забудови, вектор Пойнтинга, вектори напруженості електричного і магнітного полів.

**Abstract.** In this work the improvement of a technique of definition of the biologically safe radiation zone for the population is done, on example of the widely used, at present time, mobile base station antennas KATHREIN 739632 by identifying and taking into account all the components of the vectors of the electric and magnetic fields. The calculation of the boundaries of sanitary protection zones and building restriction area near the antenna base stations of mobile communication by imaging the near field of the antenna structure using the program MathCad 14 version and software package Feko.

**Key words:** antenna mobile communication base stations, sanitary protection zone, building restriction area, the Poynting vector, the vector of the electric and magnetic fields.

В настоящее время повсеместное применение систем мобильной связи требует постановки и решения ряда электродинамических задач, как по обеспечению их электромагнитной совместимости, так и в аспекте выполнения требований электромагнитной экологии, особенно в местах расположения антенн базовых станций (БС). Анализ существующих методик определения уровней электромагнитного поля излучения антенн БС мобильной связи и границ санитарно-защитных зон влияния на население [1] выявил множество приближений, оказывающих неточности результатов расчетов. Устранение недостатков этих методик могут быть выполнены при помощи современных средств и методов вычислительной электродинамики, теории антенн. Для этого необходимо знать пространственно-временное распределение плотности потока мощности в ближней зоне передающих антенн. Решение данной задачи в общем виде получено в [2], однако она была решена для простого симметричного вибратора.

**Целью данных исследований** является усовершенствование методики определения биологически-безопасной для населения зоны излучения, на примере широко используемой в настоящее время антенны базовой станции мобильной связи KATHREIN 739632.

Исследуемая антенна представляет собой антенную решетку (рис. 1), состоящую из 16 симметричных вибраторов, расположенных над экраном конечных размеров. Элементы расположены таким образом, чтобы обеспечить формирование электромагнитных волн Х-поляризации ( $\pm 45^\circ$ ). Расстояние между элементами как в вертикальной, так и горизонтальных плоскостях, расстояние до экрана (рис. 1), а также возбуждение элементов обеспечивают формирование диаграммы направленности (ДН) антенны в дальней зоне для каждой поляризационной компоненты со следующими параметрами:  $\theta_{\max}$  – направлением максимального излучения относительно нормали к решетке;  $\theta_{\max} = -6^\circ$ ;  $2\Delta\theta_{-3 \text{ дБ}}$ ,  $2\Delta\varphi_{-3 \text{ дБ}}$  – шириной ДН антенны по уровню половинной мощности в соответствующих плоскостях (вертикальной и горизонтальной);  $2\Delta\theta_{-3 \text{ дБ}} = 15^\circ$ ;  $2\Delta\varphi_{-3 \text{ дБ}} = 65^\circ$ .

В работе [1] дана методика расчета и построения санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон ограничения застройки (ЗОЗ) антенны базовой станции мобильной связи стандарта GSM 900 с целью определения границ биологически безопасных зон для человека. В качестве примера выполнены расчеты и построение СЗЗ и ЗОЗ для БС типа KATHREIN 739632. Установлено, что в основе методики лежит сравнение расчетных значений напряженности ЭМП и предельно-допустимых уровней (ПДУ) напряженности ЭМП, а также расчетных значений плотности потока энергии (ППЭ) и ПДУ ППЭ.

Из теории электромагнитного поля известно [3], что плотность потока электромагнитной энергии (плотность мощности), характеризуемая вектором Пойнтинга  $\vec{P}$ , определяется на основе векторного произведения

$$\vec{P} = [\vec{E}, \vec{H}], \quad (1)$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  – векторы напряженности электрического, В/м и магнитного полей, А/м соответственно.

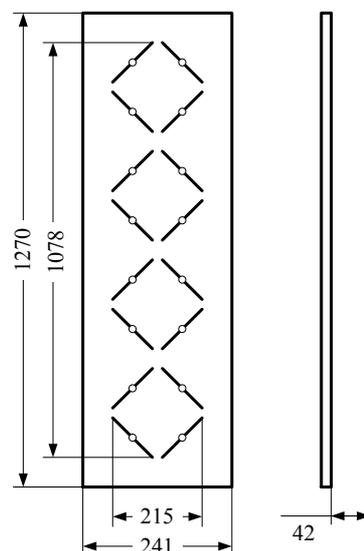


Рисунок 1 – Схема антенны базовых станций мобильной связи

Так, ППЭ в работе [1] согласно методике был рассчитан по формуле, которая не учитывает влияние пространственно-временного распределения плотности потока мощности в ближней зоне антенны и является упрощенной

$$\Pi = \frac{E^2}{Z_b}, \quad (2)$$

где  $E$  – вектор напряженности электрического поля, В/м;

$Z_b$  – волновое сопротивление среды, Ом, которое, как известно, для дальней зоны считается равным  $120\pi$  Ом.

Как было доказано в работе [2], для анализа пространственно-временного распределения плотности потока мощности в ближней зоне антенны, необходимо предварительно определить все (в общем случае – шесть) составляющие векторов напряженности электрического и магнитного полей  $\vec{E}(t), \vec{H}(t)$ , включая спектральный состав излучаемых сигналов.

$$\left. \begin{aligned} E_r &= |E_r| \cos(\omega t + \psi_r^E); & H_r &= |H_r| \cos(\omega t + \psi_r^H); \\ E_\theta &= |E_\theta| \cos(\omega t + \psi_\theta^E); & H_\theta &= |H_\theta| \cos(\omega t + \psi_\theta^H); \\ E_\phi &= |E_\phi| \cos(\omega t + \psi_\phi^E); & H_\phi &= |H_\phi| \cos(\omega t + \psi_\phi^H); \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $E_r(t), E_\theta(t), E_\phi(t)$  – составляющие вектора напряженности электрического поля в сферической системе координат;  $H_r(t), H_\theta(t), H_\phi(t)$  – составляющие вектора напряженности магнитного поля в сферической системе координат.

Для вычисления составляющих  $E_r(t), E_\theta(t), E_\phi(t)$  и  $H_r(t), H_\theta(t), H_\phi(t)$  в работе использован пакет программ FEKO, в котором реализованы основные электродинамические методы анализа антенн (FEM-МоМ, МоМ, MLFMM и др.). Некоторые результаты качественного и количественного анализа пространственного распределения доминирующих компонент электрического и магнитного полей вблизи антенны изображены на рис. 2 [4]. Несимметричность зависимостей обусловлена линейным фазовым сдвигом при возбуждении элементов антенны.

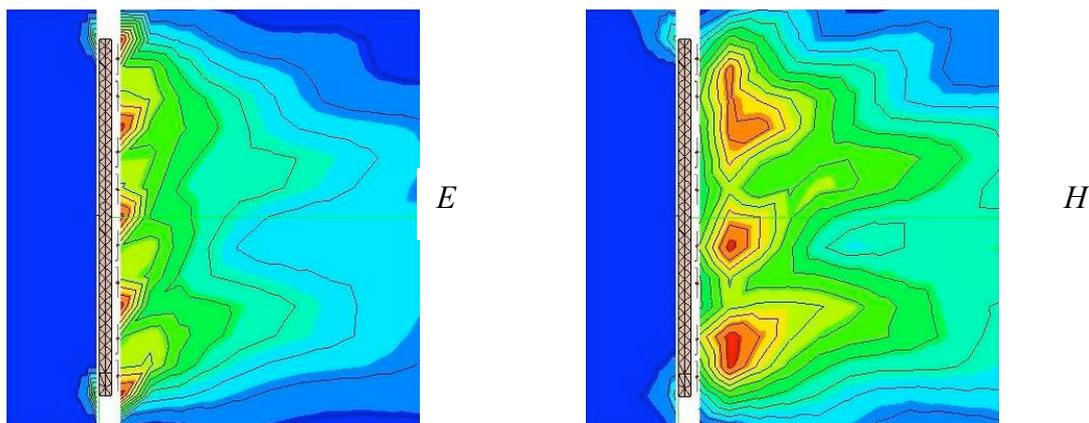


Рисунок 2 –  $E$ -компонента и  $H$ -компонента ЭМП антенны БС в вертикальной плоскости

Так, амплитудное значение вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  с учетом его разложения (3) по ортам сферической системы координат [5], будет равно

$$|\vec{\Pi}| = \sqrt{[\Pi_r^{\text{cp}} + \Pi_r(\omega t)]^2 + [\Pi_\theta^{\text{cp}} + \Pi_\theta(\omega t)]^2 + [\Pi_\phi^{\text{cp}} + \Pi_\phi(\omega t)]^2}, \quad (4)$$

где

$$\Pi_r^{cp} = 0,5 \left[ |E_\theta| |H_\phi| \cos(\psi_\theta^E - \psi_\phi^H) - |E_\phi| |H_\theta| \cos(\psi_\phi^E - \psi_\theta^H) \right];$$

$$\Pi_\theta^{cp} = 0,5 \left[ |E_\phi| |H_r| \cos(\psi_\phi^E - \psi_r^H) - |E_r| |H_\phi| \cos(\psi_r^E - \psi_\phi^H) \right];$$

$$\Pi_\phi^{cp} = 0,5 \left[ |E_r| |H_\theta| \cos(\psi_r^E - \psi_\theta^H) - |E_\theta| |H_r| \cos(\psi_\theta^E - \psi_r^H) \right] - \text{средние составляющие вектора } \Pi.$$

$$\Pi_r(\omega t) = 0,5 \left[ |E_\theta| |H_\phi| \cos(2\omega t + \psi_\theta^E + \psi_\phi^H) - |E_\phi| |H_\theta| \cos(2\omega t + \psi_\phi^E + \psi_\theta^H) \right];$$

$$\Pi_\phi(\omega t) = 0,5 \left[ |E_r| |H_\theta| \cos(2\omega t + \psi_r^E + \psi_\theta^H) - |E_\theta| |H_r| \cos(2\omega t + \psi_\theta^E + \psi_r^H) \right];$$

$$\Pi_\theta(\omega t) = 0,5 \left[ |E_\phi| |H_r| \cos(2\omega t + \psi_\phi^E + \psi_r^H) - |E_r| |H_\phi| \cos(2\omega t + \psi_r^E + \psi_\phi^H) \right] \quad - \quad \text{вариационные}$$

составляющие вектора  $\Pi$ , зависящие от времени  $t$ .

Дальнейшее его временное усреднение в пределах периода  $T$  электромагнитного колебания приведет к выражению

$$|\Pi|_{cp} = \int_0^T |\Pi| dt. \quad (5)$$

Используя результаты вышеприведенного анализа компонент вектора Пойнтинга, а также его временное усреднение, в том числе для дальней зоны антенны, и соответствующие выражения, проведено численное моделирование плотности потока энергии при произвольном расстоянии от антенны в различных направлениях (рис. 3).

На рис. 4 изображены рассчитанные с использованием (2) – кривая 1 и (5) – кривая 2 зависимости усредненной во времени амплитуды вектора Пойнтинга (плотности потока энергии). В частности, на рис. 4 представлено изменение плотности потока энергии от относительного расстояния  $r$  до точки наблюдения в направлении предполагаемого максимального излучения. Необходимо отметить, что при увеличении расстояния от передающей антенны, численные значения плотности потока энергии (усредненной во времени амплитуды вектора Пойнтинга), полученные с использованием (4), приближаются к аналогичным значениям, полученным на основании (2).

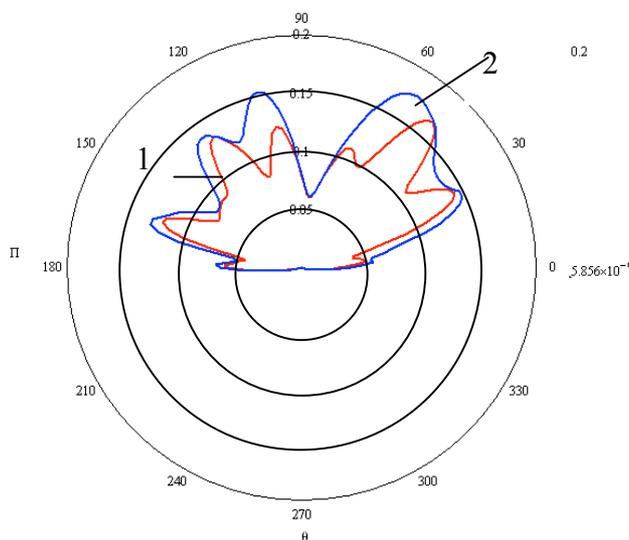


Рисунок 3 – Пространственное распределение вектора Пойнтинга в точке приема на расстоянии 65 см от передающей антенны БС:

кривая 1 – расчет ППЭ без учета вариационной составляющей;

кривая 2 – расчет ППЭ с учетом вариационной составляющей

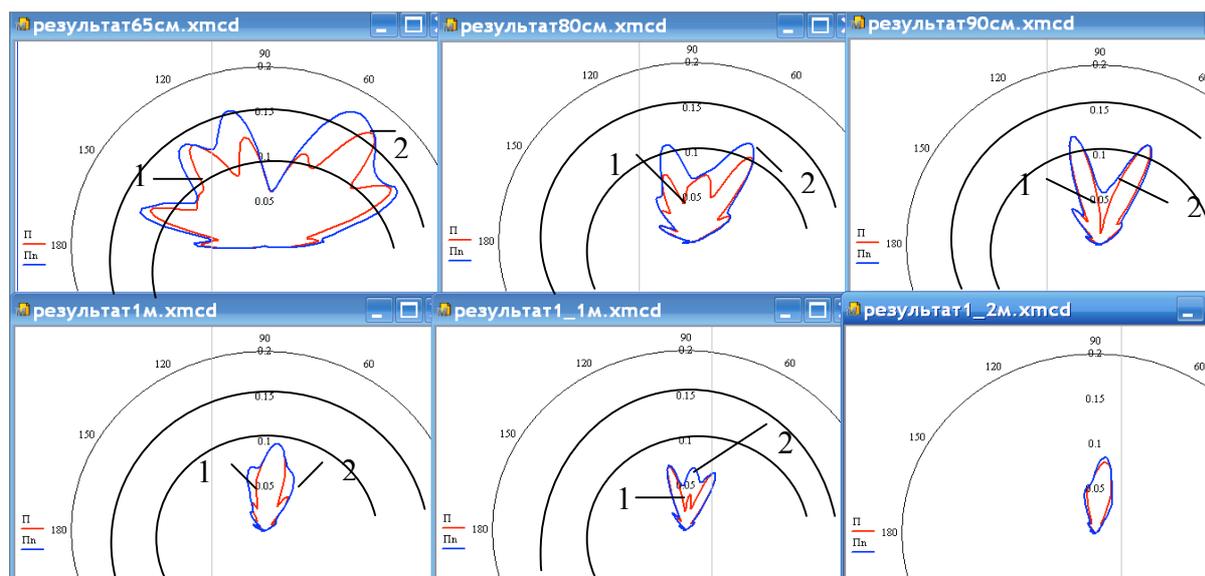


Рисунок 4 – Распределение вектора Пойнтинга на разных расстояниях от антенны БС

Интересно отметить, что совпадение значений наступает на конце границы ближней зоны, а это около 2 м для данного типа антенны.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан алгоритм расчета, анализа и визуализации структуры ближнего поля антенны применительно для расчета санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вблизи антенн базовых станций мобильной связи с помощью программы MathCad 14 version и с помощью программного пакета Feko соответственно [5].

При подстановке в уже известную методику расчета ППЭ по новой предложенной формуле получен неожиданный результат. Радиус ЗОЗ не изменился. Но в областях, расположенных в промежуточной и ближней зоне, граница зоны ограничения застройки, рассчитанная по действующей методике, получается заведомо меньше (рис. 5).

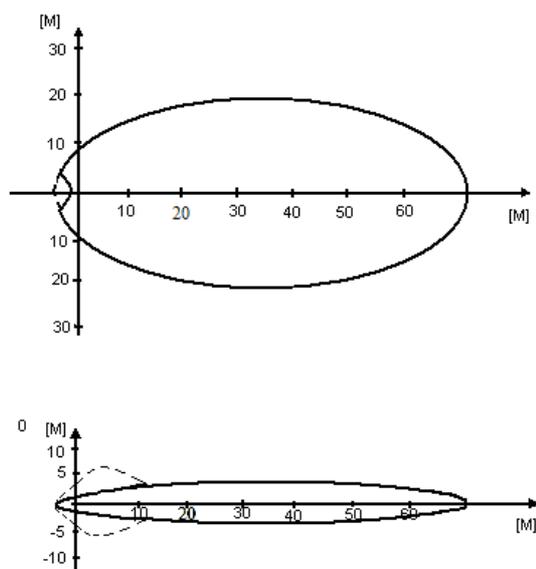


Рисунок 5 – Границы СЗЗ и ЗОЗ для антенны БС, рассчитанные по данной методике разными способами: сплошной линией – по известной формуле; пунктирной линией – по предложенному способу с учетом вариационных составляющих вектора Пойнтинга

Следует отметить, что в непосредственной близости от антенны характер изменения амплитуды поля носит очень резкий характер и на расстоянии в несколько длин волн амплитуда поля может значительно увеличиться. Учитывая тот фактор, что в условиях городской застройки антенны БС почти всегда устанавливаются на крышах жилых зданий, в которых находятся люди, ошибка, возникающая при опускании в расчетах переменной составляющей вектора Пойнтинга, в определении границы зоны опасного излучения в непосредственной близости от антенны, может иметь серьезное значение. Из этого следует, что расчет СЗЗ излучения антенн базовых станций, устанавливаемых на жилых зданиях, производить без учета переменной составляющей вектора Пойнтинга недопустимо.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) в работе проведено усовершенствование методики определения биологически-безопасной для населения зоны излучения, на примере широко используемой в настоящее время антенны базовой станции мобильной связи KATHREIN 739632 за счет определения и учета всех составляющих векторов напряженности электрического и магнитного полей.

2) в процессе исследования было установлено, что:

– при расположении точек наблюдения в промежуточной и ближней зонах оценку влияния электромагнитного поля на биологические объекты необходимо осуществлять по величине усредненной по времени мгновенной длины вектора Пойнтинга, а не по величине среднего за период значения вектора Пойнтинга;

– при расчете границ зон опасного излучения не следует пользоваться формулами расчета плотности потока энергии, справедливыми для дальней зоны, так как в непосредственной близости от антенн резко нарастает амплитуда поля в направлениях, не представляющих опасности в дальней зоне.

3) основные задачи дальнейшего совершенствования данных методик, решаемые в рамках одного из научных направлений кафедры технической электродинамики и систем радиосвязи Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова, следующие:

– адаптация существующих методик к системам мобильной связи, а именно, расчет уровней электромагнитного поля и границ санитарно-защитных зон с учетом энергетических и поляризационных характеристик направленности передающих антенн в ближней зоне, учет в расчетах особенностей мест расположения антенн, близлежащих предметов и сооружений, спектральных характеристик излучаемых сигналов;

– создание программно-аппаратного комплекса для автоматизированной аттестации мест расположения передающих антенн базовых станций мобильной связи.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Бондаренко О.В. Методика расчета и построения санитарно-защитной зоны и зоны ограничения застройки антенны базовой станции мобильной связи / О.В. Бондаренко, Л.И. Степанова // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 2016. – № 1. – С. 226 – 230.
2. Проценко М.Б. Исследование пространственно-временного изменения плотности потока энергии в ближней зоне передающих антенн / М.Б. Проценко, Л.И. Степанова, Нестерук С.В. // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 10-15.
3. Вольман В.И. Техническая электродинамика // В.И.Вольман, Ю.В.Пименов. – М.: Связь, 1971. – 486 с.
4. Проценко М.Б. Структура ближнего поля антенны базовой станции мобильной связи / М.Б.Проценко, Л.И.Степанова, С.В. Нестерук // Материали 5-й Межд. молодежной науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых [«Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2009»], (Севастополь, 20-25 апр. 2009). – Севастополь, 2009. – С.166.
5. FEKO 2004, User's Manual; Suite 4.2, EM Software & Systems (USA), Inc., Hampton, VA, Jun. [Online]. Available: <http://www.feko.info>.
6. Ільницький Л.Я. Антени та пристрої надвисоких частот: підручник [для ВНЗ] / Л.Я. Ільницький, О.Я. Савченко, Л.В. Сібрук.; за ред. Л.Я. Ільницького. — К.: Укртелеком, 2004. — 496 с.

REFERENCES:

1. Bondarenko O.V. Metodika rascheta i postroeniya sanitarno-zaschitnoy zonyi i zonyi ogranicheniya zastroyki antennyi bazovoy stantsii mobilnoy svyazi / O.V. Bondarenko, L.I. Stepanova // *Mlzhnarodniy naukovy-tehnichniy zhurnal «Vimlryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih protsesah»*. – 2016. – №1. – S. 223 – 230.
2. Protsenko M.B. Issledovanie prostranstvenno-vremennogo izmeneniya plotnosti potoka energii v blizhney zone peredayuschih antenn / M.B. Protsenko, L.I. Stepanova, Nesteruk S.V. // *Naukovl pratsl ONAZ Im. O. S. Popova*. – 2008. – №2. – S. 10-15.
3. Volman V.I. Tehnicheskaya elektrodinamika. // V.I.Volman, Yu.V.Pimenov. – M.: Svyaz, 1971. – 486 s.
4. Protsenko M.B. Struktura blizhnego polya antennyi bazovoy stantsii mobilnoy svyazi / M.B.Protsenko, L.I.Stepanova, S.V.Nesteruk // *Materialy 5-y Mez. molodezhnoy nauchno-tehnicheskoy konf. studentov, aspirantov i uchenyih [«Sovremennyye problemy radiotekhniki i telekommunikatsiy RT-2009»]*, Sevastopol, 20-25 apr. 2009. – 2009. – S.166.
5. FEKO 2004, User's Manual; Suite 4.2, EM Software & Systems (USA), Inc., Hampton, VA, Jun. [Online]. Available: <http://www.feko.info>.
6. Il'nyts'ky L.Ya. Anteny ta prystroyi nadvysokikh chastot: pidruchnyk dlya VNZ / L.Ya. Il'nyts'ky, O.Ya. Savchenko, L.V. Sibruk.; za red. L.Ya. Il'nyts'koho. - K.: Ukrtelekom, 2004. – 496 s.