

УДК 621.317.08

**В. В. ПИЛИНСКИЙ, А. С. ЧУПАХИН, Р. А. СИРОТА****МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПОМЕЩЕНИИ АППАРАТНОЙ КИНОКОНЦЕРТНОГО КОМПЛЕКСА**

Выполнена оценка уровней электромагнитных полей внутри помещения аппаратной. Проанализировано оборудование аппаратной киноконцертного комплекса: источники и рецепторы непреднамеренных электромагнитных помех. Предложен алгоритм описания электромагнитной обстановки внутри помещения киноконцертного комплекса, оборудованного функциональной аппаратурой различного назначения. Реализована прикладная программа, в которой использована методика итеративного моделирования. Представлены результаты моделирования электромагнитных полей внутри помещения аппаратной киноконцертного комплекса.

**Ключевые слова:** электромагнитная обстановка, электромагнитная совместимость, киноконцертный комплекс, источник помех, рецептор помех, нормы эмиссии, чувствительность, прогнозирование, моделирование

**Введение.** В современных условиях интенсивного увеличения функциональных возможностей радиоэлектронной аппаратуры при одновременном повышении чувствительности устройств, требования к выбору и применению средств обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования существенно возрастают.

Пример крупного объекта, оснащенного функционально-разнообразной аппаратурой, с широким диапазоном чувствительности и полос рабочих частот – современный киноконцертный комплекс. Основное место формирования сложной электромагнитной обстановки (ЭМО) – аппаратная комплекса.

Для рационального решения задачи обеспечения ЭМС киноконцертного комплекса необходимо проводить исследование и контроль ЭМО на объектах для зрелищных мероприятий перед размещением в них современной информационной, звукотехнической, силовой и др. аппаратуры с целью прогнозирования условий обеспечения ЭМС.

При современном подходе к проектированию зданий и сооружений особое значение приобретает возможность использования программных средств анализа, которые позволяют выполнить анализ ЭМО на ранних стадиях проектирования.

Сведения о прогнозировании и контроле электромагнитной обстановки в промышленных, офисных и бытовых помещениях приведены в работах, в частности, [1, 2]. На международной конференции Общества инженеров акустиков (AES 51st Conference, Helsinki, Finland - August 21-24, 2013) [3] обусловлена актуальность вопросов обеспечения ЭМС в профессиональном звуковом оборудовании. Информация по проблеме обеспечения ЭМС профессионального оборудования, используемого в кинотеатрах, концертных залах, театрах, открытых концертных площадках, те в индустрии медиа развлечений (запись и воспроизведение музыки, фильмов, видео) приведена в работах [4–6].

На основе сравнительного анализа [7] показано, что, несмотря на наличие ограничений, установленных регламентирующими документами на уровни эмиссии [8], проблема обеспечения ЭМС аппаратуры киноконцертного комплекса и источников непреднамеренных электромагнитных помех не утрачивает актуальность [9]. В современных условиях необходи-

мо постоянно совершенствовать: метод прогнозирования уровней электромагнитных помех для обоснованного применения помехоподавляющих средств: сетевых и информационных фильтров, экранирующих устройств и др.

Отметим так же, что для принятия решения о выполнении требований обеспечения ЭМС необходимо учитывать определенный запас [7].

Таким образом актуальность исследования прогнозируемой ЭМО обусловлена, с одной стороны, увеличением числа радиоэлектронных средств различного назначения, плотности их размещения и, с другой стороны, вследствие возрастания чувствительности аппаратуры. Первый фактор приводит к усложнению ЭМО источниками помех, а второй усугубляет незащищенность рецепторов.

**Цель работы.** Создание программного модуля, как основы автоматизированной системы электромагнитного мониторинга помещений киноконцертного комплекса для моделирования ЭМО помещения аппаратной.

Практическая суть работы состоит в разработке метода определения состояния электромагнитной обстановки с помощью пространственной картины электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и – прикладной программы для реализации интегрированного контроля электромагнитной эмиссии от различных источников в диапазоне исследуемых частот, а также компьютерное моделирование электромагнитных полей.

**Источники и рецепторы электромагнитных помех.** Киноконцертный комплекс представляет сложную систему взаимовлияющего в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости оборудования. Методика практической реализации создания модели технологического помещения предусматривает 2 этапа:

1) сбор исходных данных по литературе или измерения ЭМО (in situ), например представленные в [10];

2) компьютерное моделирование электромагнитного поля; например представленные в [11, 12];

Комплекс приборов в аппаратной, как источников и рецепторов непреднамеренных помех приведен в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, убедительно подтверждают тезис о сложном характере формирования

ЭМО киноконцертного комплекса как по видам и классам аппаратуры, так и по параметрам чувствительности и диапазонам частот.

Таблица 1 – Источники и рецепторы электромагнитных помех в аппаратурной

Источники	Диапазон частот
<b>1. Видеосервер</b> Мощность 500 Вт	50 Гц – 1000 МГц
<b>2. Источник бесперебойного питания</b> Мощность 0,5-10 кВт	50 Гц, 20 – 100 кГц
<b>3. Видеопроектор DLP</b> Мощность 600 Вт	
частота строчной развертки	30 – 100 кГц
частота кадровой развертки	24 – 120 Гц
блок поджига ксеноновой лампы	1000 МГц
выпрямитель питания ксеноновой лампы	300 Гц
<b>4. Радиомикрофон</b>	
Мощность излучения передатчика 10 мВт	
Чувствительность: 14 дБмкВ/м	220 – 270 МГц
24 дБмкВ/м	470 – 862 МГц
<b>5. Wi-fi роутер</b>	
мощность сигнала ≤ 100 мВт	2.4 ГГц
мощность сигнала ≤ 200 мВт	5 ГГц
Чувствительность: 65 дБмкВ/м	2.4 ГГц
58 дБмкВ/м	5 ГГц
<b>6. Мобильный радиотелефон (CDMA)</b>	
Мощность 0,6 Вт	
Чувствительность: 33 дБмкВ/м	824 – 849 МГц
<b>7. Контрольный монитор</b> Мощность 130 Вт	
сетевой трансформатор блока питания	50 Гц
статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20 – 100 кГц
блок кадровой развертки и синхронизации	48 – 160 Гц
блок строчной развертки и синхронизации	15 – 110 кГц
<b>8. Темнитель света</b>	
Мощность 2500 ВА	50 Гц

**Моделирование ЭМО.** Для описания электромагнитной обстановки внутри помещения использована методика итеративного моделирования.

Алгоритм программы представлен на рис.1. Работу с программой начинают с занесения исходных данных [10] (положение непреднамеренного источника помех в помещении аппаратурной, мощность эмиссии помех, диапазон частот). На основании входных данных программа моделирует карту электромагнитной обстановки внутри помещения. Коэффициент поглощения можно изменять от 0 до 1 в зависимости от свойств материалов. Программа реализует вычисления суммарного уровня напряженности электрического поля от всех источников эмиссии, расположенных в аппаратурной по принципу суперпозиции для одинаковых частот, а также предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности в виде секторной диаграммы.

Вблизи источника свойства поля определяют преимущественно характеристики источника. На расстоянии от источника свойства поля зависят преимущественно от среды, в которой распространяется поле. Поэтому пространство, вокруг источника разделяют на две основные области: ближнюю зону (зона индукции) и дальнюю зону (зона излучения). На

расстоянии, превышающем  $\lambda/2\pi$  – для элементарных излучателей ( $\lambda$  – длина волны), действует дальнее поле. Для любого эмитирующего электромагнитное поле элемента граничное расстояние:  $r_{cp} \geq 2l^2/\lambda$ , где  $l$  – максимальный размер объекта-излучателя.

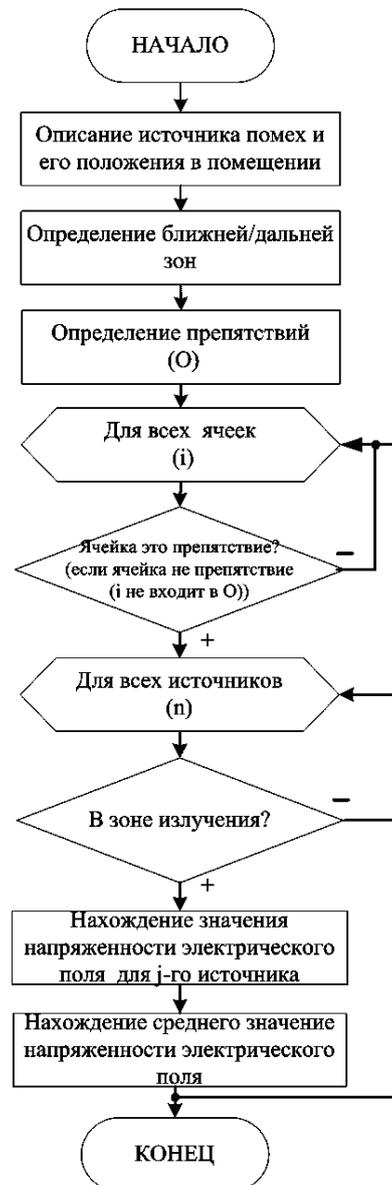


Рисунок 1 – Алгоритм моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе

Для описания ЭМО использована базовая модель элементарных эмиттеров, формула из [13].

Предложенный метод основан на разбиении всего помещения на сетку состоящую из множества сегментов, что позволяет производить вычисления в каждом отдельном сегменте. Размер сегментов принят равным  $0.1 \times 0.1$  м. Каждый из источников представленный, в табл. 1, в произвольном сегменте на расстоянии  $d$  создает электрическое поле.

$$E_{r(d)} = \frac{2E_0 d_0 2\pi h_t h_r}{d^2},$$

где  $E_{r(d)}$  – напряженность электрического поля в произ-

вольном сегменте аппаратной на расстоянии  $d$ ;  $E_0$  – напряженность электрического поля в сегменте излучения  $d_0 = 0,1$  м;  $h_r, h_t$  – высота источника и приемника.

$$E_0 \frac{\sqrt{30 \cdot P_t \cdot G_t}}{d},$$

где  $P_t$  – мощность передатчика;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны.

Разработанная прикладная программа, написана в среде Microsoft Visual Studio [14] на языке C# [15], позволяет определить суммарный средний уровень напряженности электрического поля, создаваемый в помещении аппаратной и оценить уровень напряженности электрического поля излучаемого от каждого источника в интересующей области пространства.

Программа позволяет промоделировать воздействие  $n$ -ого количества источников помех в дальней зоне в каждой точке пространства без учета интерференции. Максимально возможное количество источников электромагнитного излучения ( $n = 1 \dots 500$ ).

На рис. 2 представлены результаты моделирования ЭМО в помещении аппаратной площадью  $11,5 \text{ м}^2$ . Для моделирования использовано оборудование, которое на рис. 2 соответствует нумерации: 1 – видеосервер; 2 – источник бесперебойного питания; 3 – видеопроектор DLP; 4 – радиомикрофон; 5 – wi-fi роутер; 6 – мобильный радиотелефон; 7 – контрольный монитор; 8 – темнитель света. Помещение аппа-

ратной представлено в виде 1156 отдельных сегментов. Информация, отображаемая в сегменте ( $E$  – напряженность электрического поля, В/м) характеризует суммарный средний уровень напряженности электрического поля по каждому источнику в отдельности, достаточно выбрать интересующий сегмент, после чего будет отображена подробная информация по каждому источнику в виде секторной диаграммы.

Программа реализует вычисления суммарного уровня напряженности электрического поля от всех источников эмиссии, расположенных в аппаратной по принципу суперпозиции для одинаковых частот, а также предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности в виде секторной диаграммы, что отображено на рис.2.

Полученные результаты дают проектанту оценочную картину воздействия источников помех в интересующей области пространства с учетом естественных или специально установленных препятствий и позволяет на основании полученной картины предпринять необходимые меры по обеспечению электромагнитной совместимости, например: физического планирования или применения специальных экранов для уменьшения воздействия на чувствительное оборудование.

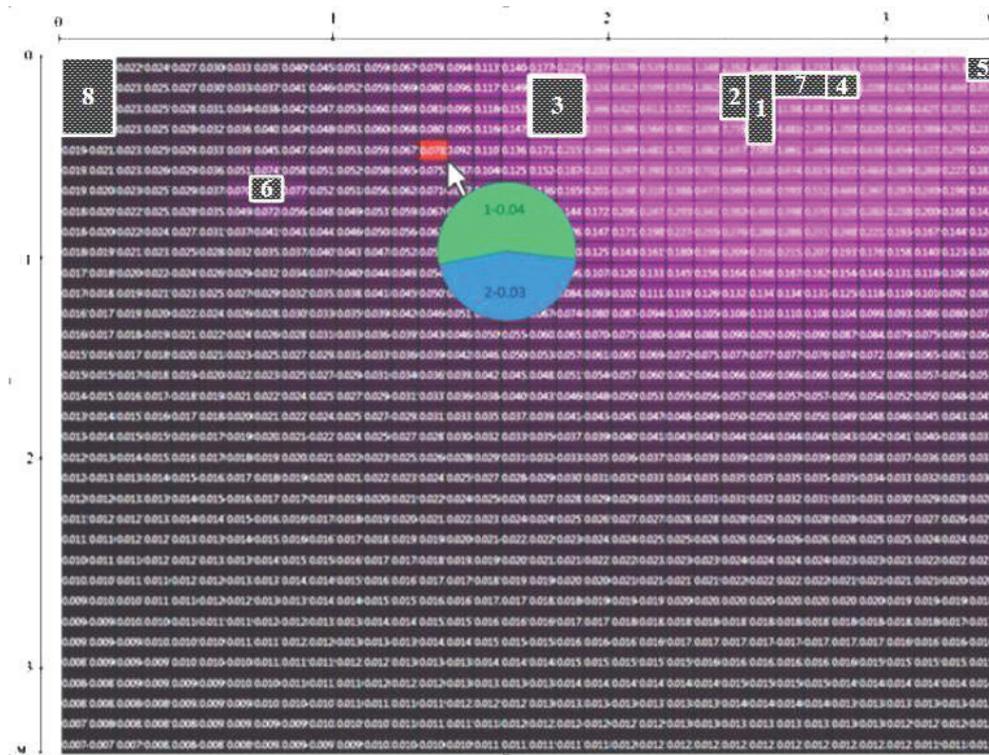


Рисунок 2 – Пример моделирования ЭМО в аппаратной

**Выводы.** 1. Обоснована необходимость прогнозирования электромагнитной обстановки в функционально насыщенных помещениях (аппаратная, микшерная, другие технологические помещения) киноконцертного комплекса.  
2. Предложена прикладная программа для зон

электромагнитного поля с возможностью визуализации прогнозируемой электромагнитной обстановки и формулирования рекомендаций.

3. На примере конкретного комплекса приборов как источников, так и рецепторов непреднамеренных помех в аппаратной киноконцертного комплекса показано об-

ласти в помещении с завышенным уровнем напряженности электрического поля и возможности выявлять, какие источники влияют более существенно на суммарный уровень напряженности электрического поля.

4. Полученные результаты позволяет проектанту принимать обоснованные решения о необходимости использования дополнительных средств по обеспечению электромагнитной совместимости в помещении, например: физическое разнесение аппаратуры, использование защитных экранов и др.

5. Нетривиальной задачей остается моделирование электромагнитных полей в ближней зоне для магнитных и электрических излучателей и разработка автоматизированной системы, позволяющей выполнять моделирование электромагнитных процессов для формирования полноценной электромагнитной картины, что представляет предмет дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Маслов М. Ю. Численный анализ электромагнитной обстановки в офисном помещении / М. Ю. Маслов // *Vestnik SONIR* 2004. – № 1 – С. 162–168. 2. Антипова С.Е. Методы прогнозирования электромагнитной обстановки на рабочих местах предприятий электроэнергетики и связи / С.Е. Антипова, В.А. Романов // *Радиотехника*. 2001. – № 9. – С. 81–85. 3. URL: <http://www.aes.org/conferences/51/program.cfm> (дата обращения: 21.10.2015). 4. Оникієнко Ю. А. Прогнозирование кондуктивных помех усилителя класса D / Ю. А. Оникієнко, В. В. Пилинский, В. Б. Швайченко // *Технологии электромагнитной совместимости*. – 2014. № 1(48). – С. 3–9. 5. Handbook for Sound Engineers (V edition) / Ed. by G. M. Ballou. – Oxford: Focal Press Publ., 2015. – 1784 p., ISBN-10: 041584293X. 6. Mei Z. L. Transparent shells – invisible to electromagnetic waves / Z. L. Mei, T. J. Cui // *Progress In Electromagnetics Research*, 2009. – Vol. 18. – P. 149–163. 7. Пилинский В. В. Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко // *Технологии ЭМС*. – 2015. – № 3 (54). – С.18–25. 8. Электромагнітна сумісність. Професійна аудіо-, відео- й аудіовізуальна апаратура та апаратура керування освітлювальними установками. Частина 1. Емісія. Норми та методи вимірювання: ДСТУ 4210-2003 (EN 55103-1:1996, MOD) – 2005. – Введ. 2005-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 24 с. 9. Armstrong K. AES-X13 and interference-free pro-audio systems / K. Armstrong, T. Waldron // *IEEE International Symposium. «EMC 2002», Sorrento, Italy, 2002.* – Vol. 1. – P. 434 – 439. 10. Пилинский В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 2 – Формирование электромагнитной обстановки силовыми цепями киноконцертного оборудования / В.В. Пилинский, М.В. Родионова, А.С. Чупахин // *Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность».* – 2009. – № 4. – С. 3-9. 11. Пилинский В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 3. Расчет электромагнитных полей в функционально насыщенном помещении / В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко, А.С. Чупахин // *Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая*

*электроника и энергоэффективность».* – 2012. – № 1. – С. 135-140. 12. Бuzов А. Л. Моделирование электромагнитных полей, возникающих за счет антенного эффекта технических средств в закрытых помещениях / А. Л. Бuzов, М. Ю. Маслов // *Антенны и электродинамика СВЧ*. – 2002. – № 7. – С. 9-12. 13. *Electromagnetic Field, Health and Environment: Proceedings of EHE'07 (Vol. 29)* / A. Krawczyk, R. Kubachi, S. Wiak, C. Lemon Antunes (Eds.) // IOS Press, Amsterdam: McGraw Hill Professional. – 2008. – 272 P. ISSN 1383-7281. 14. Johnson, B. *Professional Visual Studio 2012* / B. Johnson. – New York. Wrox Publ., 2012. – 1104 p. 15. Schildt H. *C# 4.0 The Complete Reference* / H. Schildt. – McGraw Hill Professional, NY: McGraw Hill Professional, 2010. – 976 p., ISBN-13: 978-0071741163.

**Bibliography (transliterated):** 1. Maslov, M. Y. Chislennyj analiz jelektromagnitnoj obstanovki v ofisnom pomeshhenii. M. Y. Maslov. Herald SONIR. 2004. No 1. 162–168 Print. 2. Antipova S.E. Metody prognozirovanija jelektromagnitnoj obstanovki na rabochih mestah predpriyatij jelektrojenergetiki i svjazi. S.E. Antipova, V.A. Romanov. Radio-tehnika. 2001. No 9. 81–85 Print. 3. URL:<http://www.aes.org/conferences/51/program.cfm>. 4. Onikienko J.A. Predicting Prognozirovanie konduktivnyh pomeh usilitelja klassa D. Y.A. Onikienko, V.V. Pilinsky, V.B. Shvaychenko. Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestimosti. 2014. No 1 (48). 3–9 Print. 5. Handbook for Sound Engineers (V edition). Ed. by G. M. Ballou. Oxford: Focal Press Publ. 2015. 1784 Print. 6. Mei Z. L. Transparent shells – invisible to electromagnetic waves. Z. L. Mei, T. J. Cui. Progress In Electromagnetics Research. 2009. Vol. 18. 149–163 Print. 7. Pilinsky V.V. Analysis of the allowable regulated levels of emissions and the sensitivity of equipment cinema and concert complex. V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin, V.B. Shvaychenko, A.A. Dovzhenko. Technologies EMC. 2015. No 3 (54). 18–25 Print. 8. DSTU 4210-2003, Elektromagnitna sumisnist'. Profesijna audio-, video- j audiovizual`na apparatura ta apparatura keruvannya osvituval`ny`my` ustanovkamy`. Chasty`na 1. Emisiya. Normy` ta metody` vy`miryuvannya: (EN 55103-2:1996, MOD). 2005. 24 Print. 9. Armstrong, K., Waldron, T. AES-X13 and interference-free pro-audio systems. IEEE International Symposium. EMC 2002, Sorrento, Italy. 2002. Vol. 1. 434–439 Print. 10. Pilinsky V. V. Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti sovremennoho kinokoncertnoho kompleksa. Chast' 2 – Formirovanie jelektromagnitnoj obstanovki silovymi cepjami kinokoncertnoho oborudovanija. V. V. Pilinsky, M. V. Rodionova, A. S. Chupakhin. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk «Silovaja jelektronika i jenergojeffektivnost'». 2009. Vol. 4. 3–9 Print. 11. Pilinsky V. V. Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti sovremennoho kinokoncertnoho kompleksa. Chast' 3. Raschet jelektromagnitnyh polej v funkcional'no nasyshhennom pomeshhenii. V.V. Pilinsky, V.B. Shvaychenko, A.S. Chupakhin. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk «Silovaja jelektronika i jenergojeffektivnost'». 2012. No 1. 135–140 Print. 12. Buzov, A.L. Modelirovanie jelektromagnitnyh polej, vznikajushih za schet antennoho jeffekta tehnicheskikh sredstv v zakrytyh pomeshhenijah. A.L. Buzov, M. Y. Maslov. Anteny i jelektrodinamika SVCh. 2002. No 7. 9-12 Print. 13. *Electromagnetic Field, Health and Environment: Proceedings of EHE'07 (Volume 29)*. Krawczyk A., Kubachi R., Wiak S., Lemon Antunes C. (Eds.). IOS Press, Amsterdam: McGraw Hill Professional. 2008. 272 Print. 14. Johnson B. *Professional Visual Studio 2012*. B. Johnson. New York. Wrox Publ., 2012. 1104 Print. 15. Schildt H. *C# 4.0 The Complete Reference*. H. Schildt. McGraw Hill Professional, NY: McGraw Hill Professional, 2010. 976 Print.

Надійшла (received) 31.10.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Пилинский Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

**Pilinsky Vladimir Vladimirovich** – candidate of engineering sciences, professor, NTUU «KPI», Kiev, tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

**Чупахин Александр Сергеевич** – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

**Chupakhin Alexander Sergeevich** – postgraduate, NTUU «KPI», Kiev, tel.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

**Сирота Роман Александрович** – технический директор «GEAR Electronics», Киев, тел.: (066) 703-53-81; e-mail: sir.intellect@gmail.com

**Sirota Roman Alexandrovich** – technical director, «GEAR Electronics», Kiev, tel.: (066) 703-53-81; e-mail: sir.intellect@gmail.com