

## **ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ НА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ФОКУСИРОВКОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ И РЕКТЕНЕ**

Гомозов А.В., Шокало В.М., Грецких Д.В., Аль-Самарай Ш.Ф.А.  
Харьковский национальный университет радиотехники  
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. основ радиотехники, тел. (057) 702-14-30,  
E-mail: ortk@kture.kharkov.ua

The condition of works on systems of wireless transfer of the electric power is stated. The system of wireless transfer of the electric power of small range on the basis of multiitem system of radiation with focusing one-stage discrete V-shaped multifrequency signals and the aerial-rectifier to remote objects which are located in mountains, on islands of the seas and large lakes is offered. Spatial, time and power characteristics of such signals, and also structures of a trans-ferring subsystem and system of wireless transfer of the electric power as a whole are resulted. Productivity and zones of biological safety for attendants and local population are defined.

На этапе становления электротехники беспроводную передачу энергии (БПЭ) предложил Н. Тесла, получив в 1891 г. патент США на "БПЭ (эффект Тесла)". Патент с носителем энергии переменного тока реализован им в системе освещения Всемирной выставки Чикаго в 1893 г. [1,2]. В 60-е годы XX века создали мощные генераторы сверхвысокой частоты (СВЧ) и начался новый виток интереса к БПЭ [1,3]. Исследования с разным темпом продолжались в экономически развитых странах: США, Канаде, Франции, СССР, Великобритании, Японии, России и др. [1]. Целесообразность создания БПЭ и их использования показана рядом экспериментов. Крупномасштабный эксперимент по передаче 30 кВт мощности СВЧ на расстояние 1,6 км был проведен в 1975 г. [1]. В ректене было около 5 тыс. приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), каждый преобразовывал 6 Вт мощности СВЧ. КПД ректенны составил 82% на частоте 2388 МГц [1].

С конца XX века в основном рассматривались возможности создания ректенн размерами до 10×13 км и мощных солнечных космических электростанций с дальностями передачи и приема СВЧ энергии до 4000 км [1]. Для создания таких электростанций нужны еще демонстрационные эксперименты по приему солнечной энергии и ее преобразованию в постоянный ток и энергию СВЧ излучения в таких ректеннах. Для этого по оценке специалистов требовались бы десятки лет и сотни миллиардов долларов.

Авторы на многопозиционных системах излучателей (МСИ) с фокусировкой электромагнитного излучения (ЭМИ) и ректеннах предложили пути реализации БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам. К ним могут относиться объекты, расположенные высоко в горах, на островах морей, крупных озер, в др. местах, к которым по техническим, экономическим и др. причинам создание воздушных, надводных, подземных и подводных линий передачи электроэнергии невозможно или нецелесообразно.

Для таких систем БПЭ не излагались принципы работы и построение, структуры излучаемых сигналов, производительность, обеспечение биологической безопасности операторов и населения, Эти вопросы и являются целью данной работы.

Для сокращения сеансов работы БПЭ нужны высокие энергетические характеристики ЭМИ, что реализуемо в МСИ с фокусировкой ЭМИ [3]. Предложены различные методы фокусировки ЭМИ в МСИ и фазированных антенных решетках (ФАР). БПЭ к труднодоступным объектам должны иметь также высокую производительность и простую реализацию. В них заранее известны положения, полосы рабочих частот МСИ и ректенн. Поэтому не нужно сканирование СВЧ излучения. Эффективно эти требования решаются при использовании МСИ с пространственно-фазово-частотной (ПФЧ) фокусировкой одноступенчатых дискретных (ОСД) V-образных многочастотных с линейной частотной модуляцией (МЧ ЛЧМ) сигналов [3]. Такие МСИ обеспечивают высокую плот-

ность мощности сфокусированных пространственно–временных импульсов (ПВИ) без сканирования и требуемые их параметры. При большом числе излучателей и снижении их мощностей создается высокая общая мощность МСИ, облегчается биологическая защита операторов и местного населения. Математическим моделированием для МСИ с ПФЧ фокусировкой, количеством излучателей  $N=33$ , мощностью излучателей  $P_n=10$  кВт, размещенных в круге радиусом 500 м, для разных расстояний до точек фокусировки получены ее пространственно–временные и энергетические характеристики при ОСД V–образных МЧ ЛЧМ сигналах. По результатам моделирования получены зависимости количества формируемых ПВИ от дальности до точки фокусировки и уровня их боковых лепестков от количества излучателей, приведены рекомендации по выбору расстояния до точки фокусировки и эмпирическое выражение для определения требуемого количества ПВИ в такой МСИ. Специфика работы данных систем БПЭ обуславливает следующие требования к сфокусированным ПВИ: а) непрерывная и длительная работа с максимальной спектральной плотностью мощности ПВИ; б) исключение поражения такими ПВИ радиоэлементов ректенн БПЭ. Поражение последних может происходить за счет их деградации под воздействием пачек ПВИ своей МСИ, имеющих большие плотности мощности. Степень деградации радиоэлементов зависит от постоянной времени релаксации тепловых процессов (тепловой инерции)  $\tau_T$  и суммарного времени воздействия всей пачки ПВИ без учета интервалов между ними  $\tau_{\Sigma}$ . Деградация может иметь место, если длительность одиночного ПВИ  $\tau_{\text{в}} \leq \tau_{\text{к}}$  и период их следования  $T_{\text{в}} < \tau_T$ , где  $\tau_{\text{к}}$ – время срабатывания устройства защиты от перегрузок по СВЧ входу ректенны.

По приведенным в [3,5] параметрам полупроводниковых материалов, используемых в ректеннах и определяющих их тепловую инерцию, наибольшее рассчитанное значение составило  $\tau_T=410$  нс для арсенида галлия. Значения  $\tau_T=410$  нс и полученное в [3]  $\tau_{\Sigma}=100$  мс, достаточные для поражения полупроводниковых приборов, можно принять исходными при обосновании целесообразной структуры воздействующих пачек ПВИ.

С учетом указанного выше структуру пачек ПВИ предложено создать в виде двух частей, которые при необходимости длительного воздействия могут излучаться с разрядом. Первая часть по сравнению с обоснованными в [3] для поражения радиоэлементов числом ПВИ в пачке  $N_{\text{вп}}=10^7$  и временем суммарного воздействия без учета интервалов между ними  $\tau_{\Sigma\text{вп}}=100$  мс, чтобы исключить вывод ими из строя ректенн, как минимум, с десятикратным энергетическим запасом, должна иметь число импульсов в пачке ПВИ и ее длительность без учета интервалов между ними соответственно  $N^{\text{р}}_{\text{вп}(2)} = (N_{\text{вп}}/10)=10^6$  и  $\tau^{\text{р}}_{\text{вп}(2)}=10^6 \tau^{\text{р}}_{\text{вп}(2)}=10$  мс. Вторая часть структуры ПВИ должна быть в виде свободного интервала времени (без заполнения импульсами ПВИ), равного  $\tau_{\text{т.макс}}=410$  нс. Он обеспечивает надежную релаксацию тепловых эффектов, вызванных воздействием первой части структуры ПВИ. Полная длительность такой структуры пачек ПВИ равна

$$\tau^{\text{р},(1)}_{\Sigma\text{вп}(2)} = s [N^{\text{р},(1)}_{\text{вп}(2)} \cdot \tau^{\text{р},(1)}_{\text{в}(2)} + \tau_{\text{т.макс}}], \quad (1)$$

где индекс "р" сверху означает, что формула относится к МСИ; индекс (1) сверху означает, что рассматривается внутриволновое воздействие; индекс (2) снизу означает воздействие пачкой МЧ ЛЧМ радиоимпульсов.

В рассматриваемых БПЭ для снижения потерь и повышения коэффициента полезного действия по передаче энергии предложено согласовывать геометрические площади ректенн и поперечных сечений лучей ЭМИ в точках  $z_{\text{р}}$ .

Передающие МСИ в БПЭ с фокусировкой указанных выше сигналов можно реализовать на базе существующих станций наведения ракет (СНР) типа "Тор" с ФАР и когерентными импульсными сигналами. Они имеют закрепленные на кабинах квадратные ФАР с размерами  $L_x=L_y=1,7$  м и высотой их фазовых центров  $h_a=5$  м [3].

Для систем передачи электроэнергии к наземным объектам (БПЭ–1) максимальную дальность фокусировки при высоте фазовых центров ФАР в СНР  $h_a$  и ректенн  $h_{\text{р}}$  целесообразно задавать не более дальности прямой радиолокационной видимости  $D_{\text{пв}}$ ,

рассчитываемой по широко известной простой формуле  $z_{F1} \leq D_{ПВ} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2}$ , где  $D_{ПВ}$  имеет размерность [км],  $h_a$  и  $h_p$  – размерности [м]. Стандартными размещениями для БПЭ–1 можно считать установку СНР с ФАР и ректенн на земной поверхности в типовых кабинах при  $h_a = h_p = 5$  м и на специальных насыпях, пилонах или зданиях при  $h_a = h_p = 10$  м. Тогда для БПЭ–1 при  $h_a = h_p = 5$  м и  $h_a = h_p = 10$  м необходимые дальности фокусировки  $z_{F1} \leq D_{ПВ1} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2} = 4,12[(5)^2 + (5)^2]^{1/2} \approx 29$  км и  $z_{F1} \leq 4,12[(10)^2 + (10)^2]^{1/2} = 58$  км.

Для БПЭ–2 к горному объекту с фазовым центром ректенны, расположенным на высоте от подножия горы  $h_{p2} = 5$  км и на дальностях от точки его проекции на плоскость подножия до фазовых центров ФАР  $k$ -х СНР в МСИ  $D_p = 5$  км, необходимые наклонные дальности фокусировки  $z_{F2} \leq D_H = [(h_{p2})^2 + (D_p)^2]^{1/2} = [(25 \cdot 10^3)^2 + (25 \cdot 10^3)^2]^{1/2} \approx 7$  км.

Для снижения энергетических потерь сечения диаграмм направленности передающих МСИ и приемных ректенн таких БПЭ должны иметь круглые формы и, следовательно, круглые формы апертур ректенн. Радиусы круглых апертур ректенн  $r_{КР}$  должны быть небольшими для обеспечения повышенной устойчивости к ветровой нагрузке. Для БПЭ–1 и БПЭ–2 в [3] обосновано, что можно принять  $r_{КР1} = 0,85$  м и  $r_{КР2} = 0,75$  м.

Целесообразные обобщенный для БПЭ–1 и БПЭ–2 план размещения элементов (вид сверху) и расположение элементов в БПЭ–2 (вид сбоку) показаны на рис. 1 и 2 [3].

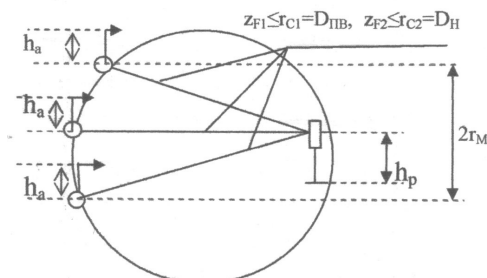


Рис. 1. План БПЭ–1 и БПЭ–2 (вид сверху)

Рис. 2. Структура БПЭ–2 (вид сбоку)

На основании вышеуказанного для БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам в [3] обоснованы следующие целесообразные параметры ректенн и МСИ:

1. Передающие МСИ состоят из СНР с ФАР, размещаемых по дуге (рис. 1):

1.1. Для БПЭ–1 к наземным объектам база  $L_{M1} = 1$  км, число СНР с ФАР  $k_1 = 9$ , дальность фокусировки  $z_{F1} \leq D_{ПВ} = 58$  км.

1.2. Для БПЭ–2 к горным объектам база  $L_{M2} = 670$  м, число СНР с ФАР  $k_2 = 5$ , дальность фокусировки  $z_{F2} \leq D_H = 7$  км.

1.3. ФАР содержат  $n_{ПД} = 4$  квадратных подрешеток с размерами и числом излучателей  $(L_{ПД})^2 = (85 \times 85)$  см<sup>2</sup> и  $n_{ПФ} = (n \times m) = (12)^2 = 144$ .

1.4. Длина волны и интервалы между излучателями в квадратных подрешетках с размерами их сторон  $L_{ПД} = 0,85$  м и числом излучателей  $n = m = 12$  составляют  $\lambda_0 \leq (L_{ПД}/n) = (0,85/12) \approx 0,07$  м и  $d_{ХПФ} = d_{УПФ} \approx 0,07$  м.

1.5. Коэффициенты усиления подрешеток ФАР при работе с узким лучом круглого сечения  $G_{ПФ} \approx (15000/4) = 3750$ .

2. Размеры апертур ректенн для БПЭ–2 и БПЭ–1 равны  $A_{p2} = \pi(r_{p2})^2 = \pi(0,75)^2 = 1,77$  м<sup>2</sup> и  $A_{p1} = \pi(r_{p1})^2 = \pi(0,85)^2 = 2,27$  м<sup>2</sup>.

3. Излучаемые сигналы ОСД V-образные МЧ ЛЧМ когерентные пачки радиоимпульсов:

3.1. Начальные частоты сигналов в  $k$ -ых СНР равны  $f_{0nm} \approx (4,3 \pm 0,1)$  ГГц, максимальный разнос частоты  $\Delta F^{P,(1)}_{\max(2)} = 50$  МГц и дискретность частоты  $\Delta F^{P,(1)}_{(2)} = 25$  МГц.

3.2 Структура пачек ПВИ определяется в соответствии с выражением (1). При этом  $N^{P,(1)}_{ВП(2)} = 10^6$ ,  $\tau^{P,(1)}_{ВСП(2)} = 0,01$  с, период повторения импульсов в первой части струк-

туры пачек ПВИ при  $\tau_{B(2)}^{P(1)}=20$  нс принимается  $T_{1B(2)}^{P(1)}=40$  нс и их скважность  $Q_{1B(2)}^{P(1)}=2$ . Вторая часть имеет вид свободного интервала времени, равного  $\tau_{\max}=410$  нс.

4.. Мощности радиоимпульсов для всех излучателей каждой из подрешеток ФАР около  $P_{\text{nm}}=21,5$  Вт, а полная мощность импульсного излучения каждой подрешетки  $P_{\text{пф}}=n_{\text{пф}} \times P_{\text{nm}}=144 \times 21,5 \approx 3,1$  кВт.

Излучателями МСИ предложенных БПЭ являются подрешетки ФАР из СНР типа "Тор". В БПЭ-1 к наземным объектам обоснованное в [3] их целесообразное число равно  $N_{1\text{МС}}=(k_1 \times n_{\text{пд}})=(9 \times 4)=36$ , а к горным объектам  $N_{2\text{МС}}=(k_2 \times n_{\text{пд}})=(5 \times 4)=20$ . Дальняя граница зоны Френеля подрешеток ФАР в СНР типа "Тор" и, следовательно, в обеих предложенных БПЭ  $z_{\text{ДП}}=[2(L_{\text{пх,у}})^2/\lambda_0]=[2(0,85)^2/0,07] \approx 20,6$  м, что намного меньше требуемых дальностей фокусировки ЭМИ  $z_{F1} \leq D_{\text{ПВ}}=58 \cdot 10^3$  м и  $z_{F2} \leq D_{\text{Н}}=7 \cdot 10^3$  м. Поскольку в предложенных БПЭ амплитудное распределение сигналов излучателей по апертурам МСИ равно-мерное, апертурные излучатели одинаковые и  $z_{F1,2} \geq z_{\text{ДП}}$ , обеспечивается синфазное сложение полей и выражение для расчета максимальных плотностей мощности ОСД V-образных МЧ ЛЧМ когерентных пачек радиоимпульсов имеет вид

$$S_{\max(2)}^{P(1)} = N_{1,2\text{МС}}^2 \frac{P_{\text{пф}} G_{\text{пф}}}{4\pi z_{F1,2}^2} \quad (2)$$

Результаты расчетов достижимых значений  $S_{1,2 \max(2)}^{P(1)}$  при  $P_{\text{пф}}=3,1$  кВт и  $G_{\text{пф}}=3750$  для БПЭ-1 с  $N_{1\text{МС}}=36$  на расстояниях  $z_{F1}$  и для БПЭ-2 с  $N_{2\text{МС}}=20$  на расстояниях  $z_{F2}$  приведены в табл. 1.

Достижимые значения  $S_{1,2 \max(2)}^{P(1)}$  в БПЭ-1 и БПЭ-2.

Табл. 1

$S_{1,2 \max(2)}^{P(1)}$ в БПЭ-1 и БПЭ-2									
$S_{1 \max(2)}^{(1)}$ в БПЭ-1, мВт/см <sup>2</sup>					$S_{2 \max(2)}^{(1)}$ в БПЭ-2, мВт/см <sup>2</sup>				
Значения $z_{F1}$ , км					Значения $z_{F2}$ , км				
30	40	50	55	60	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0
0,132	0,076	0,049	0,04	0,035	3,0	2,3	1,47	1,02	0,745

При оценке реализуемости таких БПЭ, имеющих от 5 до 9 СНР с ФАР по 4 подрешетки и большую суммарную мощность СВЧ излучения, проведены расчеты степени биологической защиты обслуживающего персонала и населения вблизи МСИ. При  $z_{\text{ДП}} \ll z_{F1,2}$  расстояние до зоны безопасности  $z_{(2)ЗБ 1,2}^{P(1)}$  от подрешеток ФАР в МСИ можно оценивать по полученному из (2) выражению [3,4]:

$$z_{(2)ЗБ 1,2}^{P(1)} \geq [N_{1,2\text{МС}}^2 P_{\text{пф}} G_{\text{пф}} / 4\pi S_{B(2)}^{(1)}]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $S_{B(2)}^{(1)} = S_{\text{НБ}} / \delta_{\text{бл}} \delta_{\text{зб}} \delta_{\text{оч}}$ ;  $S_{\text{НБ}}$ —норма безопасной работы в условиях СВЧ облучения;  $\delta_{\text{бл}}$ —коэффициент ослабления поля СВЧ в направлениях боковых лепестков по отношению к оси ДН антенны;  $\delta_{\text{зб}}$ —коэффициент ослабления поля СВЧ при применении на краях ФАР защитных бленд (металлических козырьков) с покрытием их кромок радиопоглощающим материалом;  $\delta_{\text{оч}}$ —коэффициент ослабления эффективности воздействия поля СВЧ на ткани и органы без терморцепторов, к которым относятся зрачки глаз человека [4]). При выполнении оценок по (3) исходным условием принимается уровень плотности мощности ЭМИ ближних боковых лепестков ДН в интервале  $\pm(5...22)^\circ$  от оси ДН подрешеток ФАР. Это связано с тем, что оси последних устанавливаются неподвижно в направлении строго на фазовые центры ректенн БПЭ.

В [3,4] на основе анализа ряда справочных данных выявлено, что для большинства ФАР при типовом шаге квантования фазы  $\Delta\varphi_{\text{ф}}=11,25^\circ$ , числе излучателей  $n_{\text{пф}} \geq 144$  значение коэффициента ослабления  $\delta_{\text{бл}} \leq -46$  дБ; за счет бленд с радиопоглощающими покрытиями на их кромках значение  $\delta_{\text{зб}} = -20$  дБ; за счет использования очков типа ОРЗ-5 значение  $\delta_{\text{оч}} = -(30...20)$  дБ и норма безопасности  $S_{\text{НБ}}=10$  мкВт/см<sup>2</sup>. Тогда границы зон безопасности для БПЭ-1 с  $N_{1\text{МС}}=36$  и для БПЭ-2 с  $N_{2\text{МС}}=24$  в соответствии с выражением (3) при  $\delta_{\text{зб}}=\delta_{\text{бл}}\delta_{\text{зб}} \delta_{\text{оч}}=116$  дБ  $=0,25 \cdot 10^{-11}$  должны для операторов и местного населения, использующих очки, аналогичные типу ОРЗ-5, выбираться соответственно порядка  $z^{(1)}$

$z_{\text{ЗБ1}}^{(2)} \geq 5,4$  м и  $z_{\text{ЗБ2}}^{(1)} \geq 3,6$  м, а без использования таких защитных очков соответственно порядка  $z_{\text{ЗБ1}}^{(1)} \geq 170^*$  м и  $z_{\text{ЗБ2}}^{(1)} \geq 114^*$  м. Поэтому по периметру с тыловой стороны МСИ необходимо создавать запретные зоны, в которых обслуживающему персоналу и особенно местному населению нельзя находиться без защитных очков, аналогичных ОРЗ-5, для БПЭ-1 глубиной не менее 170\* м и для БПЭ-2 не менее 114\* м.

Для предложенных систем БПЭ-1 и 2 в [3] проведены расчеты мощности, создаваемой пачкой ПВИ в течение суммарного времени их воздействия без учета интервалов между ними при  $s$  циклах излучения МСИ за 2,4,8 и 16 часов непрерывной работы  $P_{\text{ВЭС}(2)}^{P,(1)}$ , где нижний индекс ВЭС означает учет суммарного времени воздействия пачек ПВИ без интервалов между ними при  $s$  циклах излучения пачек ПВИ в МСИ. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Значения  $P_{\text{ВЭС}(2)}^{(1)}$  для систем БПЭ-1 и 2, МВт.

Табл. 2

БПЭ-1 , $z_{F1}$ , км	$P_{\text{ВЭС}(2)}^{P,(1)}$ , МВт								БПЭ-2 , $z_{F2}$ , км
	БПЭ-1, за время				БПЭ-2, за время				
	2 час	4 час	8 час	16 час	2 час	4 час	8 час	16 час	
60	0,19	0,38	0,75	1,5	3,06	6,12	12,24	24,48	7
55	0,21	0,42	0,85	1,7	4,2	8,4	16,8	33,6	6
50	0,26	0,52	1,04	2,08	5,4	10,8	21,6	52,7	5
40	0,4	0,81	1,62	3,24	9,48	19,0	38,0	76,0	4
30	0,7	1,4	2,8	5,6	12,36	24,72	49,4	99,0	3,5

Из табл. 2 видно, что на выходе БПЭ-1 при ее параметрах, принятых выше, и дальностях до обслуживаемого объекта  $z_{F1}=(60...30)$  км за 8 часов работы накапливается суммарная мощность постоянного тока (0,75...2,8) МВт, а за 16 часов (1,5...5,6) МВт. На выходе же БПЭ-2 при ее параметрах и дальностях  $z_{F2}=(7...3,5)$  км за 8 часов работы накапливается суммарная мощность постоянного тока (12,3...49,4) МВт, а за 16 часов (24,5...99,0) МВт.

Таким образом, изложенные структурно-алгоритмические предложения по построению, оценки реализуемости, производительности, биологической защиты операторов и местного населения от СВЧ излучений показывают возможности создания эффективных систем БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам на МСИ, содержащих существующие СНР типа "Тор" с ФАР и ПФЧ фокусировкой ОСД V-образных МЧ когерентных радиоимпульсов, и ректеннах.

### Литература.

1. Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецих Д.В. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем БПЭ микроволновым лучом./ Под ред. В.М. Шокало.-Харьков: Коллегиум. 2006.-308 с.
2. Никола Тесла //Еженедельное издание "100 человек, которые изменили ход истории". -М.: ООО "Де Агостино", вып. 93, 2009. -31 с.
3. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Ермаков Г.В., Титов С.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ./ Под ред. В.И. Гомозова.-Харьков: КП «Городская типография», 2011.-330 с.
4. Абрамов Л.А., Гомозов В.И., Екимов В.Ф. и др. Радиопередающие устройства радиотехнических систем ПВО. / Под ред. А.И. Ергана. -Харьков: ВИРТА, МО СССР, 1975. -419 с.
5. Чумаков В.И., Егоров А.М., Лонин Ю.Ф. и др. Моделирование теплового механизма в полупроводниках при воздействии импульсным электромагнитным полем. //Problems of atomic science and technology. Series Nuclear Physics Investigations, № 2 (40), 2004.