

Д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО,
к. т. н. В. В. СИМОНОВ, к. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО

Дата поступления в редакцию
14.07 2003 г.

Украина, Одесский национальный политехнический ун-т
E-mail: kpra@rtf.ospu.odessa.ua

Оппонент к. т. н. А. С. КОНДРАШОВ
(ЦПМиМ СПбО РАН, г. С.-Петербург)

РАЦИОНАЛЬНЫЙ УЧЕТ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ ИХ КОНСТРУИРОВАНИИ

Предлагаются два подхода к обеспечению функциональных свойств электронных модулей с учетом влияния особенностей их конструкторской реализации.

Основной задачей создания новых электронных модулей различного назначения является обеспечение их функциональных свойств в рамках определенной конструкторской реализации. Вместе с тем любому варианту конструкции электронных модулей (печатной плате, плате поверхностного монтажа, гибридной толсто пленочной или тонко пленочной ИС и др.) присущи паразитные элементы, в частности, распределенные в пространстве емкости и индуктивности [1]. Многообразие форм таких элементов и их описания приведены в ряде работ, в частности, в [2, 3].

В настоящей работе предложен рациональный учет влияния паразитных элементов на функциональные характеристики модулей при их проектировании.

Наиболее распространенными из паразитных элементов конструкций электронных модулей можно считать структуры, приведенные на рис. 1.

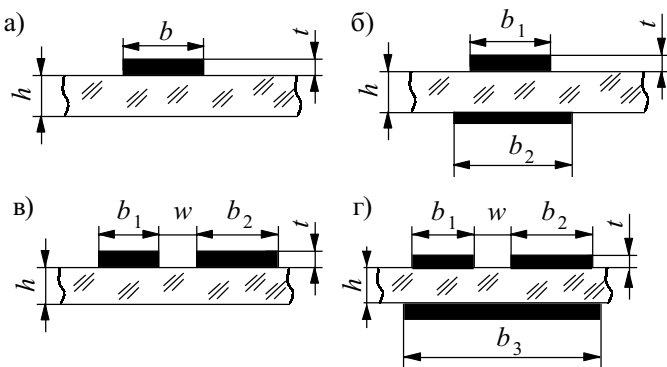


Рис. 1

Аналитические описания параметров этих структур регламентируются ОСТ 4.ГО.010.009 и опубликованы в работах [4—6].

Используя для простоты применения этих описаний их полиномиальную аппроксимацию на основе метода гладкой кривой [7], получаем следующие зависимости.

Индуктивность L для варианта рис. 1, а описывается выражением [3, с. 92]

$$L = L_{\text{пог}} l, \quad (1)$$

где $L_{\text{пог}}$ — погонная индуктивность, нГн/мм —

$$L_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 a_k b^k;$$

a_k — коэффициент;
 b — ширина проводника, мм;
 l — длина проводника, мм.

Для $b \geq 0,2$ мм и $t = 0,05$ мм коэффициенты a_k ($k = 0,3$) принимают следующие значения: $a_0 = 1,916107$, $a_1 = -5,696810 \cdot 10^{-1}$, $a_2 = 1,026150 \cdot 10^{-1}$, $a_3 = -5,981123 \cdot 10^{-3}$.

Величина емкости C для варианта рис. 1, б может быть определена с помощью следующего соотношения [1, с. 148]:

$$C = C_{\text{пог}} \epsilon^*, \quad (2)$$

где $C_{\text{пог}}$ — погонная емкость, пФ/мм —

$$C_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 d_k \alpha^k;$$

d_k — коэффициент;
 $\alpha = h/b_1$;
 h — толщина подложки (платы), мм;
 b_1 — ширина верхнего проводника, мм;
 l — длина проводников, мм;
 $\epsilon^* = 0,5(\epsilon_d + \epsilon_n)$;

ϵ_d, ϵ_n — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (воздуха, лака), подложки (платы), соответственно.

Для $b_1 = b_2$ и $h/b_1 \geq 0,2$ значения коэффициентов d_k ($k = 0,3$) записываются следующим образом: $d_0 = 6,159423 \cdot 10^{-2}$; $d_1 = -6,321903 \cdot 10^{-2}$; $d_2 = 2,288700 \cdot 10^{-2}$; $d_3 = -2,477977 \cdot 10^{-3}$. Для случая $b_2 \geq 3b_1$ имеем: $d_0 = 7,210831 \cdot 10^{-2}$; $d_1 = -6,411777 \cdot 10^{-2}$; $d_2 = 2,223319 \cdot 10^{-2}$; $d_3 = -2,356979 \cdot 10^{-3}$.

Емкость C для варианта рис. 1, в описывается формулой (2) со следующим представлением $C_{\text{пог}}$:

$$C_{\text{пог}} = \sum_{k=0}^3 g_k \beta^k, \quad (3)$$

где g_k — коэффициент;
 $\beta = w/b_1$;
 w — расстояние между проводниками, мм.

Коэффициенты g_k принимают значения $g_0 = 2,469371 \cdot 10^{-2}$, $g_1 = -1,393143 \cdot 10^{-2}$, $g_2 = 4,395322 \cdot 10^{-3}$, $g_3 = -4,682092 \cdot 10^{-4}$ для $b_1 = b_2$, а для $b_2 \geq 3b_1$ их можно описать в виде $g_0 = 2,830172 \cdot 10^{-2}$; $g_1 = -1,606446 \cdot 10^{-2}$; $g_2 = 5,469429 \cdot 10^{-3}$; $g_3 = -5,981431 \cdot 10^{-4}$.

Взаимоиндуктивность M (нГн) между проводниками для этого же варианта структуры описывается выражением [1, с. 146]

$$M = 0,2l \left[\ln l + \sum_{k=0}^3 p_k \gamma^k \right], \quad (4)$$

где коэффициент p_k принимает значения $p_0=1,636665$, $p_1=-1,987409$, $p_2=3,381906 \cdot 10^{-1}$, $p_3=-1,848080 \cdot 10^{-2}$, а $\gamma = w+0,5(b_1+b_2)$.

Для конструкции рис. 1, z взаимноиндуктивность M представима в виде [6, с. 83]

$$M = 0,2l \left[\gamma/h + \ln l + \sum_{k=0}^3 q_k \gamma^k \right], \quad (5)$$

где $q_0=2,636666$, $q_1=-1,987409$, $q_2=3,381906 \cdot 10^{-1}$; $q_3 = -1,848080 \cdot 10^{-2}$.

Емкость C для этого случая описывается аналогично соотношению (2) с представлением $C_{\text{пор}}$ следующим образом [4, с. 80]:

$$C_{\text{пор}} = 34 / [v(v+2) \cdot \varphi(\mu) \cdot (\varphi(\mu) + 0,175v)], \quad (6)$$

где $v=2w/b$; $\varphi(\mu) = \sum_{k=0}^3 u_k \mu^k$; $\mu=2h/b$; $b=b_1=b_2$; $u_0=2,670401$; $u_1=-7,699293 \cdot 10^{-1}$; $u_2=7,969450 \cdot 10^{-2}$; $u_3=-2,365636 \cdot 10^{-3}$.

Дополнительные описания емкостей, индуктивностей и взаимноиндуктивностей можно найти в [1—6].

Учет влияния описанных в (1)—(6) паразитных элементов (а также элементов на основе других конструктивных вариантов [2, 4, 5]) при проектировании электронных модулей можно осуществлять посредством двух подходов. Первый из них требует итерационной взаимосвязи схемотехнического и конструкторского проектирования. Второй подход позволяет обеспечить решение задачи последовательно (схемотехнический анализ, затем конструкторское проектирование) — без указанной взаимосвязи. Практический интерес представляют оба подхода, поэтому рассмотрим их особенности более подробно на примере разработки конструкторской реализации диодно-транзисторной логики (ДТЛ) [8, с. 59—61] (рис. 2) в виде ГИС.

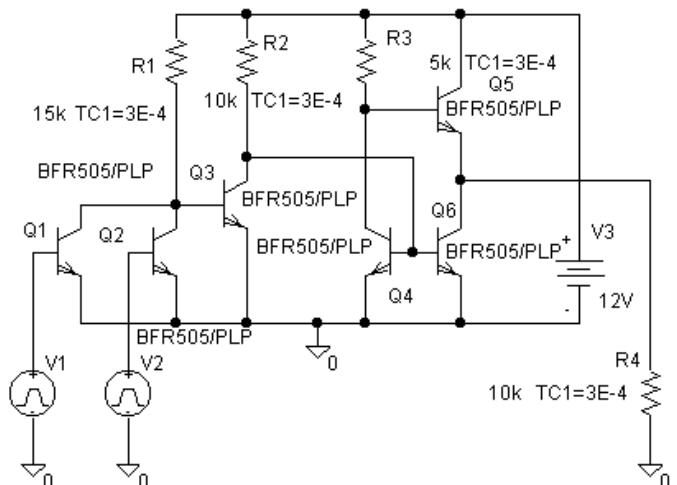


Рис. 2

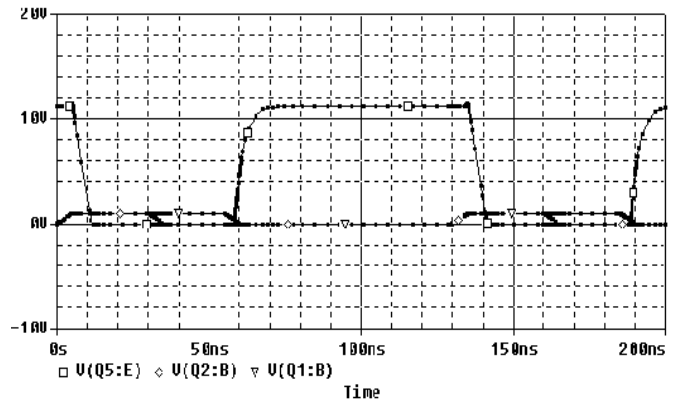


Рис. 3

Графики нормальной работы ДТЛ рис. 2 для $t=27^\circ\text{C}$ приведены на рис. 3.

Итак, в первом подходе после отработки схемы рис. 2 со свойствами, показанными на рис. 3, проектируется топология ДТЛ на базе тонкопленочной технологии (для сокращения объема иллюстративного материала варианты топологии ГИС не приводятся). При этом для первого варианта топологии характерны паразитные элементы (см. рис. 1 и выражения (1—6)), основные из которых представлены на принципиальной схеме ДТЛ конденсаторами CP_i ($i=1,5$) и индуктивностями LP_i ($i=1,4$) с соответствующими их значениями (рис. 4).

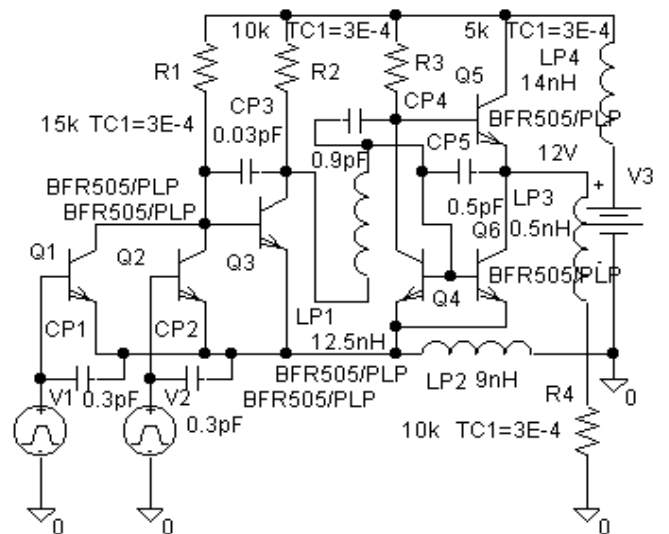


Рис. 4

Наличие отмеченных паразитных элементов обуславливает искажения выходного сигнала ДТЛ (рис. 5), что требует корректировки топологии ГИС.

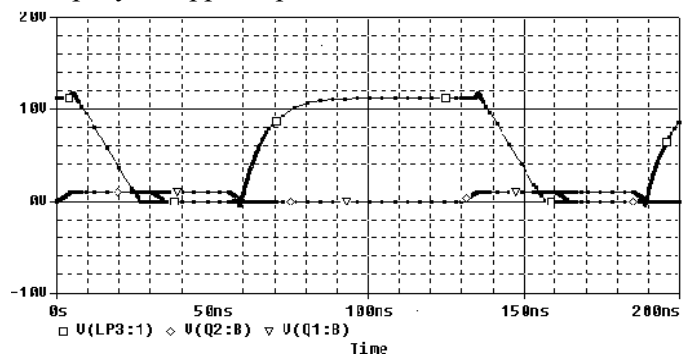


Рис. 5

Изменение топологии ГИС позволило получить следующие значения паразитных элементов — $CP_1=0,7$ пФ; $CP_2=0,7$ пФ; $CP_3=0,5$ пФ; $CP_4=0,1$ пФ; $CP_5=0,3$ пФ; $LP_1=11$ нГн; $LP_2=12$ нГн; $LP_3=5$ нГн; $LP_4=7$ нГн, что обеспечило удовлетворительное функционирование ДТЛ (рис. 6).

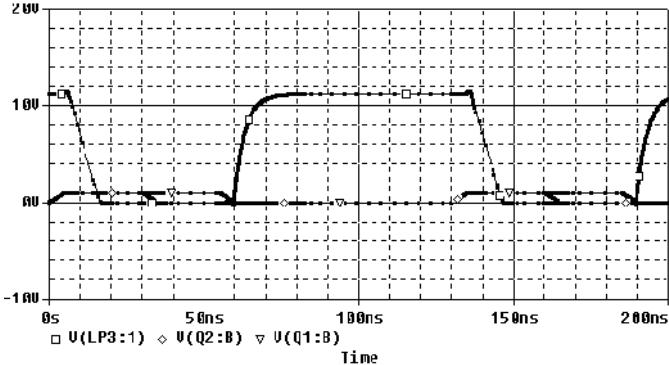


Рис. 6

Действительно, сравнение графиков рис. 3 и 6 показывает незначительное изменение в форме выходного сигнала ДТЛ, в частности, значения длительности переднего ($\tau_{пfi}$) и заднего ($\tau_{зfi}$) фронтов i -го варианта составляют: $\tau_{пf1}=10$ нс, $\tau_{пf2}=12$ нс, $\tau_{зf1}=7$ нс, $\tau_{зf2}=10$ нс.

Таким образом, первый подход требует итеративной корректировки топологии ГИС с последующим расчетом параметров паразитных элементов схемы (соотношения (1)–(6)) и ее анализом в среде SxСАПР.

Второй подход базируется на предварительном схемотехническом анализе схемы ДТЛ (см. рис. 2) в среде SxСАПР с учетом паразитных элементов, которые возможны при ее реализации в виде ГИС. Такая схема ДТЛ приведена на рис. 7.

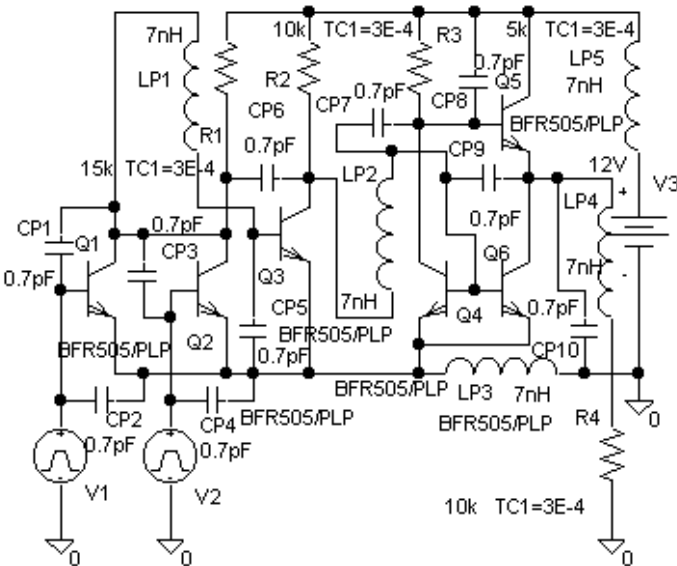


Рис. 7

Первоначальные значения паразитных параметров $CP_i=0,7$ пФ ($i=1,10$) и $LP_i=7$ нГн ($i=1,5$) (рис. 7) обуславливают значительные искажения выходного сигнала ДТЛ (рис. 8), в частности, с показателями $\tau_{пф}=70$ нс, $\tau_{зф}=20$ нс.

Дальнейший многовариантный анализ схемы ДТЛ рис. 7 в среде SxСАПР позволил определить следу-

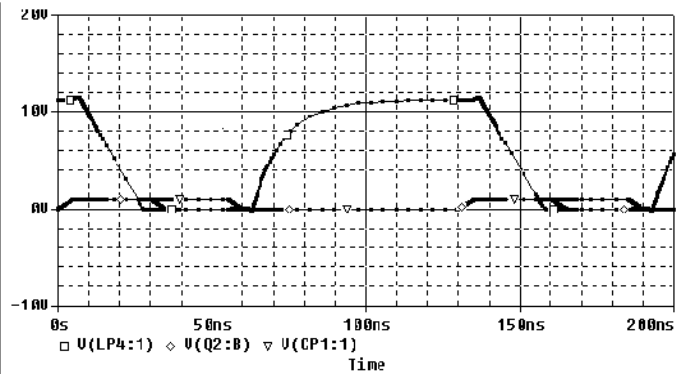


Рис. 8

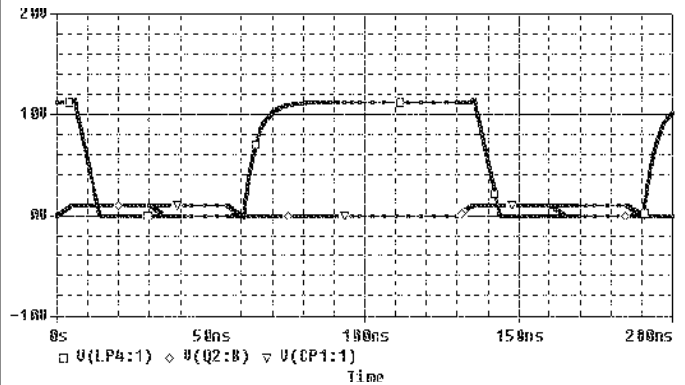


Рис. 9

ющие значения параметров паразитных элементов: $CP_1=0,1$ пФ; $CP_2=CP_4=CP_5=1$ пФ; $CP_3=0,1$ пФ; $CP_6=CP_7=CP_8=CP_9=0,1$ пФ; $CP_{10}=0,9$ пФ; $LP_1=14$ нГн; $LP_2=10$ нГн; $LP_3=17$ нГн; $LP_4=7$ нГн; $LP_5=9$ нГн, которые определяют допустимые искажения сигнала на R4 (рис. 9) ($\tau_{пф}=15$ нс, $\tau_{зф}=8$ нс).

На основании этих результатов рассчитываются соответствующие конструктивные ограничения на форму элементов топологии ГИС ДТЛ (выражения (1)–(6)). Например, для варианта рис. 1, а целесообразно рассматривать два ограничения (1):

$$l \leq \frac{L}{\sum_{k=0}^3 a_k b^k}; \quad b \leq B_i; \quad i=1,3, \quad (7)$$

где $B_i = \Lambda_i - a_2/3a_3$; $\Lambda_1 = u+v$; $\Lambda_2 = \epsilon_1 u + \epsilon_2 v$; $\Lambda_3 = \epsilon_2 u + \epsilon_1 v$;

$$\epsilon_{1,2} = -0,5 \pm j\sqrt{3}/2; \quad u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}}; \quad v = \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}};$$

$$q = \frac{1}{2} \left[\frac{2a_2^3}{27a_3^3} - \frac{a_2 a_1}{3a_3^2} + \frac{a_0 l - L}{la_3} \right]; \quad p = \frac{1}{3} \left[\frac{3a_3 a_1 - a_2^2}{3a_3^2} \right]; \quad j = \sqrt{-1}.$$

Соотношения, аналогичные (7), можно получить и для других конструктивных вариантов, приведенных на рис. 1. В ряде случаев удобно формировать ограничения по одному параметру конструкции паразитного элемента, зафиксировав остальные на уровне их минимально возможных значений с учетом ограничений современных технологий производства ГИС. При этом удобно воспользоваться известными методами и алгоритмами решения нелинейного уравнения, например, ZEROIN [9].

Другими словами, во втором подходе в процессе проектирования топологии ГИС нет необходимости

многократного обращения к СхСАПР, достаточно лишь учитывать выработанные для данной схемы конструктивные ограничения.

В заключение отметим, что проектирование конструкций современных быстродействующих электронных модулей неотделимо от анализа функционирования их схем в среде СхСАПР. При этом выбор первого или второго подхода к решению указанной задачи зависит от опыта и возможностей разработчика.

Недостатком первого подхода следует считать потребность в многократной корректировке конструкции электронного модуля с учетом его функциональных характеристик. А отрицательной стороной второго подхода является необходимость предварительного многовариантного анализа схемы электронного модуля в среде СхСАПР с целью выявления возможных ограничений на его конструкцию.

Возможен также комбинированный подход, объединяющий преимущества обоих рассмотренных подходов и заключающийся в следующем. На первом этапе определяются параметры возможных паразитных элементов схемы электронного модуля, в наибольшей степени влияющих на его функциональные свойства. На втором этапе после разработки конструкции электронного модуля с учетом полученных

ограничений проводится проверочный анализ его схемы в среде СхСАПР с последующей корректировкой отдельных конструктивных особенностей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Верхопятницкий П. Д., Латинский В. С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры.— Л.: Судостроение, 1983.
2. Горобец А. И., Степаненко А. И., Коронкевич В. М. Справочник по конструированию радиоэлектронной аппаратуры (печатные узлы).— К.: Техніка, 1985.
3. Кузмин А. Я. Конструирование и микроминиатюризация электронной вычислительной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1985.
4. Шерстнев В. В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА.— М.: Радио и связь, 1984.
5. Сборник задач и упражнений по технологии РЭА / Под ред. Е. М. Парфенова.— М.: Высш. школа, 1982.
6. Компоновка и конструкции микросистемной аппаратуры / Под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. Б. Пестрякова, О. А. Пятлина.— М.: Радио и связь, 1982.
7. Николаенко В. М., Николаенко О. В. Аппроксимация характеристик макромоделей электронных устройств методом гладкой кривой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 1.— С. 13—15.
8. Алексенко А. Г., Шагурин И. И. Микросхемотехника.— М.: Радио и связь, 1982.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений.— М.: Мир, 1980.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Украина, г. Одесса, 2—6 июня 2004 г.

Национальная Академия наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Министерство промышленной политики Украины, Украинское физическое общество, Институт физики полупроводников НАН Украины, Институт радиотехники и электроники РАН, ОАО "Укрналит", Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

п р о в о д я т

Международную научно-техническую конференцию "Сенсорная электроника и микросистемные технологии" ("СЭМСТ-1") с выставкой разработок и промышленных образцов сенсоров.

Рабочие языки конференции: украинский, русский, английский.

Научные направления конференции

- Физические, химические и другие явления, на основе которых могут быть созданы сенсоры.
- Проектирование и математическое моделирование сенсоров.
- Сенсоры физических величин.
- Оптические и оптоэлектронные сенсоры.
- Акустоэлектронные сенсоры.
- Химические сенсоры.
- Биосенсоры.
- Материалы для сенсоров.
- Технологические проблемы сенсорики.
- Сенсоры и информационные системы.
- Деградация, метрология и аттестация сенсоров.
- Микросистемные технологии (MST).

Адрес для переписки: НИЛ-3, Оргкомитет "СЭМСТ-1", ОНУ им. И. И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина

Тел./факс +38(0482) 23-34-61. Лепих Ярослав Ильич.
E-mail: ndl_lepikh@gomail.com.ua, ndl_lepikh@mail.ru
<http://odnu.edu.ua/conference/physics/~>

