

УДК 621.383

## Исследование влияния алгоритма ВЗН на выходные характеристики многорядного МФПУ

К. В. Козлов, П. А. Кузнецов

*В работе исследуется влияние алгоритма режима временной задержки и накопления (ВЗН) на выходные характеристики многорядного матричного фотоприемного устройства (МФПУ). В качестве параметров выходных характеристик используются пространственное разрешение и амплитуда сигнала от точечной цели. Рассмотрены два способа реализации режима ВЗН внутри большой интегральной схемы (БИС) считывания: на основе аналогового КМОП ВЗН-регистра и на основе ВЗН-сумматоров. Исследованы зависимости пространственного разрешения и амплитуды ВЗН-сигналов от значения коэффициента переноса заряда между ячейками регистра. Предложен универсальный метод выбора параметров ВЗН-регистра. Произведено сравнение двух способов реализации режима ВЗН с точки зрения параметров выходных характеристик МФПУ.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Ключевые слова: МФПУ, ВЗН, МФЧЭ, БИС считывания, ЧКХ, ВЗН-регистр.

### Введение

Многорядные матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) [1—5] широко используются для достижения предельных значений по чувствительности и пространственному разрешению. В режиме ВЗН сигналы со всех фоточувствительных элементов (ФЧЭ) канала суммируются последовательно, в результате чего отношение сигнал/шум МФПУ возрастает в  $\sqrt{N}$  раз (в случае идеального ВЗН-суммирования), где  $N$  — количество фоточувствительных элементов в составе ВЗН-канала. На практике выходное изображение ВЗН-МФПУ может существенно отличаться от изображения синтетического, полученного из предположений идеального режима ВЗН. Причинами данного отличия являются: асинхронность оптико-механического сканирования и суммирования сигналов внутри большой интегральной схемы (БИС) считывания, отклонение направления сканирования от направления ВЗН-суммирования, искажение сигналов в процессе суммирования внутри БИС и т. д.

В данной работе проведено исследование эффективности режима ВЗН при различных способах его реализации внутри БИС-считывания.

### Постановка задачи

В качестве критериев эффективности режима ВЗН будем рассматривать амплитуду сигнала от точечной цели и пространственное разрешение, определяемое с помощью частотно-контрастной характеристики [6].

Для дальнейших расчетов используется модель МФПУ с режимом ВЗН [7], топология которого состоит из 4-х субматриц, смещенных друг относительно друга. Размер фоточувствительного элемента равен 30 мкм, расстояния между соседними ФЧЭ в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию равны соответственно 45 и 60 мкм. Период пространственной дискретизации изображения в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равен 15 мкм за счет перекрытия субматриц и трех выборок значений сигналов за время перемещения пятна излучения между соседними ФЧЭ канала.

Козлов Кирилл Владимирович, инженер 1 кат.<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.  
Кузнецов Петр Александрович, главный специалист<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (495) 373-94-00.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2015 г.

© Кузнецов П. А., Козлов К. В., 2015

### Использование аналогового КМОП ВЗН-регистра

Наиболее классическим способом реализации режима ВЗН является использование аналогового КМОП ВЗН-регистра [8]. Так как в рассматриваемом случае производится три выборки значений сигналов при перемещении изображения между соседними ФЧЭ канала, общее количество

ячеек ВЗН-регистра вычисляется в соответствии с соотношением  $3(N-1)+1$ . Особенностью ВЗН-регистра является неединичный коэффициент переноса заряда  $K_{пер}$  между ячейками, что приводит к эффекту «памяти» ячейки о предыдущих значениях заряда.

На рис. 1 представлены выходные характеристики ВЗН-канала при равномерной засветке всех его ФЧЭ коротким импульсом ( $t_u < T_{int}$ , где  $t_u$  — продолжительность импульса,  $T_{int}$  — время накопления). Результаты получены при  $N = 20$ ,  $K_{пер} = 0,97$  (а) и  $K_{пер} = 1$  (б).

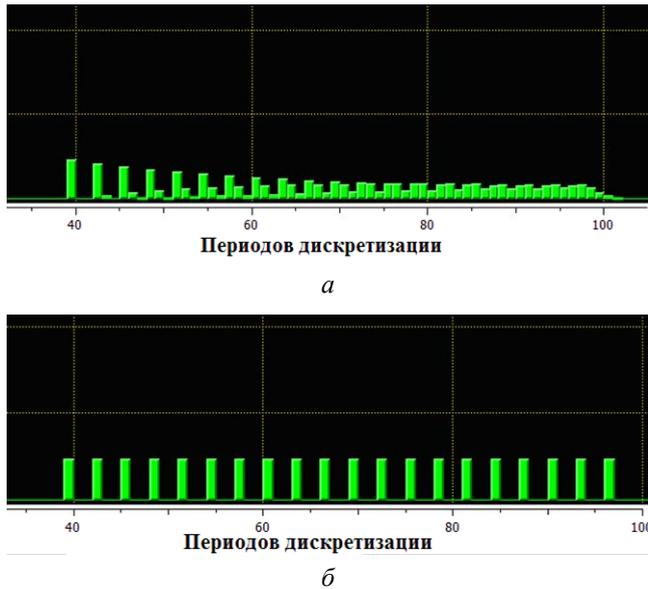


Рис. 1. Выходная характеристика ВЗН-канала при подаче на вход короткого импульса ( $K_{пер} = 0,97$  (а) и  $K_{пер} = 1$  (б))

Данный вид характеристик является демонстрацией эффективности реализации режима ВЗН в БИС считывания.

Обозначим номер такта ВЗН-суммирования, на котором амплитуда «остаточного» сигнала ста-

новится равной половине амплитуды основного сигнала, как  $N_{0,5}$ . В соответствии с характеристикой, представленной на рис. 1, а,  $N_{0,5} = 6$  при  $K_{пер} = 0,97$ . В табл. 1 представлены значения  $N_{0,5}$  при различных значениях коэффициента переноса заряда.

Таблица 1

$K_{пер}$	0,97	0,98	0,99
$N_{0,5}$	6	8	17

Неединичный коэффициент переноса заряда приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения системы, а также к уменьшению амплитуды выходного сигнала. Вычисления, результаты которых представлены на рис. 2—5, проведены при  $N = 10$ . На рис. 2 представлены выходные изображения МФПУ с режимом ВЗН при различных значениях коэффициента переноса. Рис. 2, а соответствует значению  $K_{пер} = 0,97$ , 2, б —  $K_{пер} = 1$ . На рис. 2, в представлены изображения точечных источников излучения (внутри кружка радиуса 15 мкм сосредоточено  $\approx 80\%$  энергии излучения). Сверху представлено пятно, соответствующее значению  $K_{пер} = 1$ , снизу —  $K_{пер} = 0,97$ . Данные изображения демонстрируют влияние «остаточного» заряда ВЗН-регистра на итоговый сигнал.

На рис. 3 представлены выходные характеристики ВЗН-канала при засветке матрицы ФЧЭ точечным источником излучения. Случай 3, а соответствует значению  $K_{пер} = 1$ ; 3, б —  $K_{пер} = 0,97$ . Таким образом, уменьшение коэффициента переноса заряда на 3 % (относительно единичного) приводит к уменьшению амплитуды сигнала от точечного источника излучения на 20 %.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды сигнала от значения коэффициента переноса.

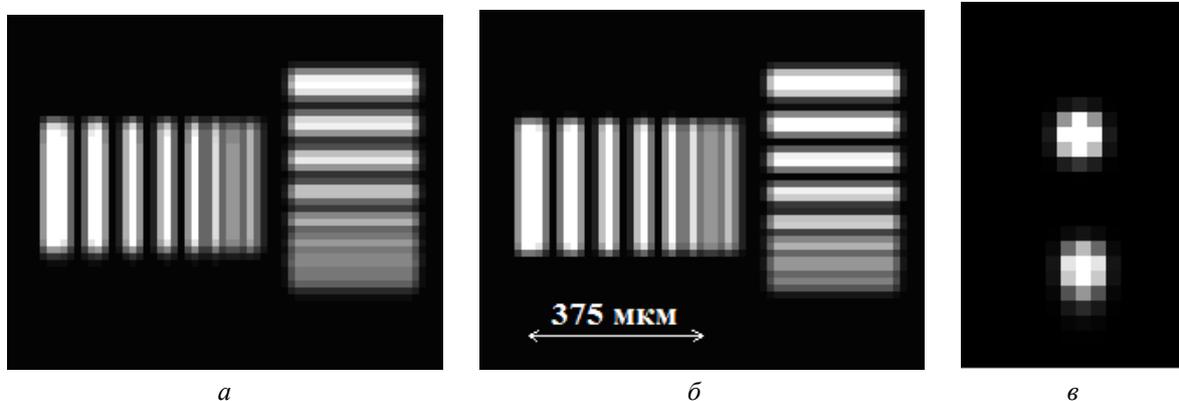


Рис. 2. Изображения на выходе МФПУ при различных значениях  $K_{пер}$

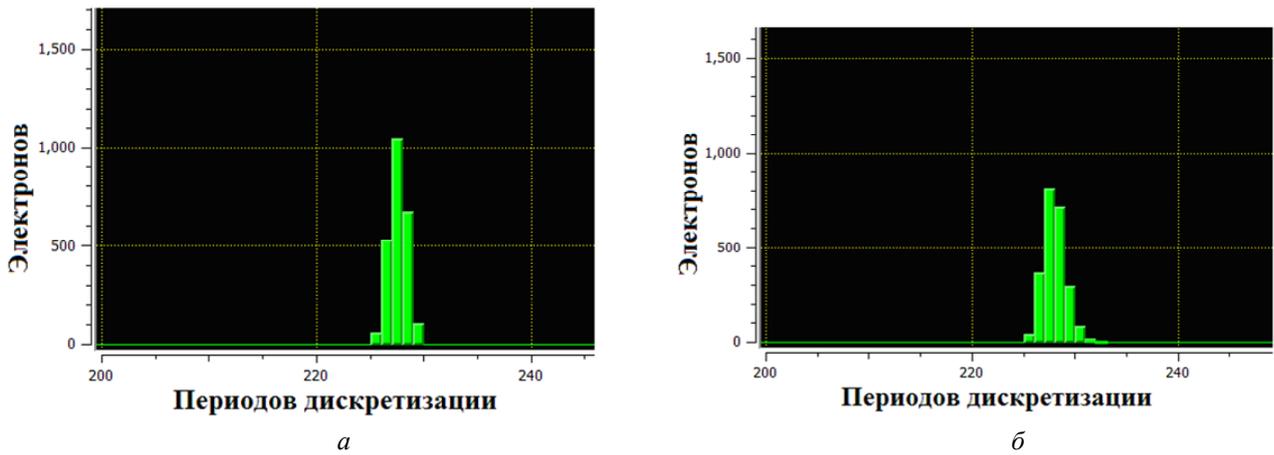


Рис. 3. Временные характеристики ВЗН-канала при засветке МФЧЭ точечным источником излучения при различных значениях  $K_{пер}$  (а —  $K_{пер} = 1$ , б —  $K_{пер} = 0,97$ )

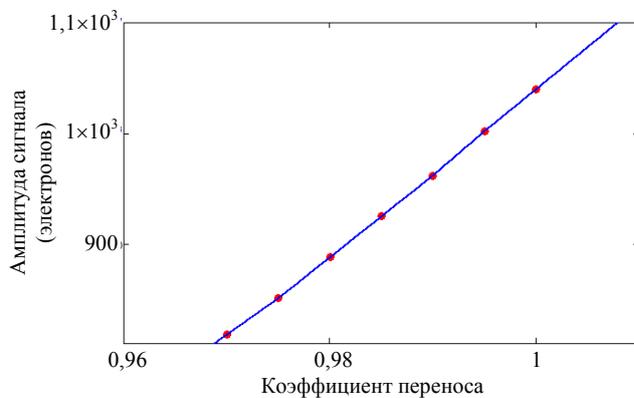


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала от значения коэффициента переноса

Предложим метод выбора параметров ВЗН-регистра на основании требуемого пространственного разрешения. На рис. 5 представлены частотно-контрастные характеристики МФПУ [6] с режимом ВЗН при двух значениях коэффициента

переноса заряда (а —  $K_{пер} = 1$ , б —  $K_{пер} = 0,97$ ). Обозначим через  $f_{зр}$  пространственную частоту, соответствующую значению контраста, равному 0,2 (согласно критерию Рэля).

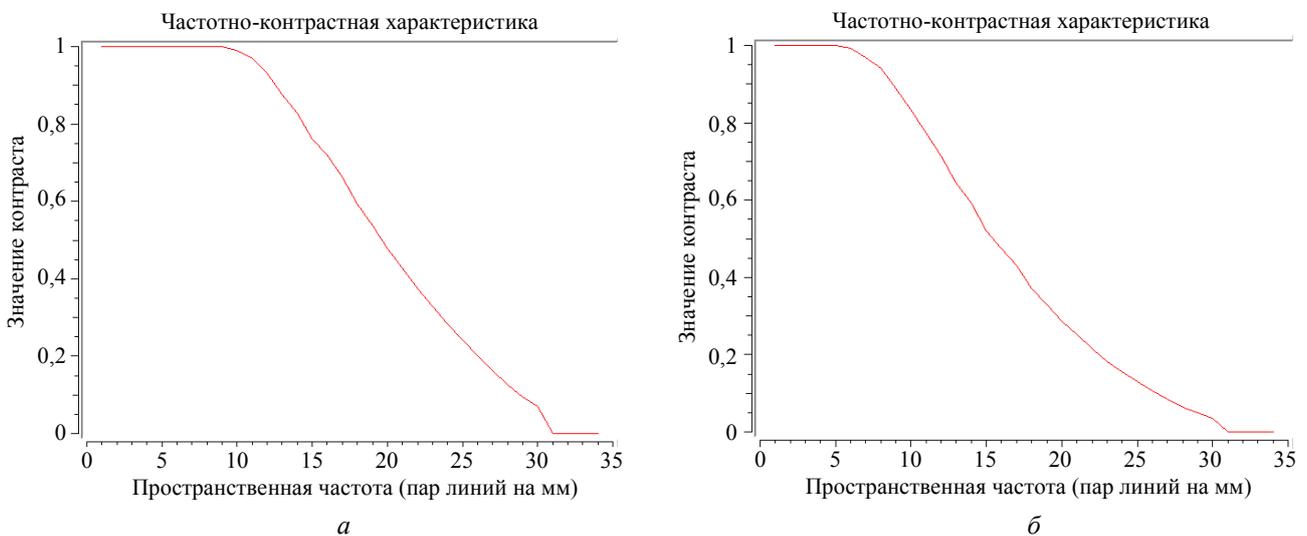


Рис. 5. ЧКХ при различных значениях  $K_{пер}$  (а —  $K_{пер} = 1$ , б —  $K_{пер} = 0,97$ )

На рис. 6 представлены зависимости  $f_{zp}$  от значения коэффициента переноса при трех различных значениях  $N$ . Отметим, что угол наклона представленных характеристик зависит только от количества ФЧЭ в составе ВЗН-канала, при этом чем меньше значение  $N$ , тем меньше угол наклона характеристики. Коэффициент переноса заряда определяется физико-топологическими параметрами БИС считывания. Таким образом, область допустимых значений  $N$  при заданном пространственном разрешении определяется с помощью семейства характеристик, представленных на рис. 6.

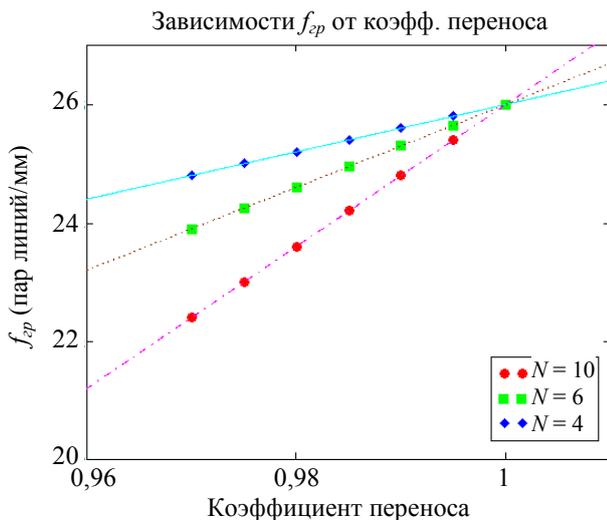


Рис. 6. Зависимости  $f_{zp}$  от значения коэффициента переноса при различных значениях  $N$

### Использование матрицы ВЗН-сумматоров

Для реализации режима ВЗН внутри БИС-считывания в аналоговом виде возможно использование матрицы ВЗН-сумматоров [8]. Данный способ подразумевает параллельное суммирование сигналов с использованием матрицы емкостей, что позволяет избежать негативных эффектов, связанных с многократным переносом заряда вдоль регистра. Соответственно вклад БИС в пространственное разрешение становится независимым от количества ФЧЭ в составе ВЗН-канала ( $f_{zp} = 26$  пар линий/мм в соответствии с рис. 6). Отсутствие потери заряда в процессе ВЗН-суммирования положительно сказывается на амплитуде итогового сигнала, а именно, возрастание сигнала происходит в  $\approx N$  раз.

Недостатком рассматриваемого способа (по сравнению с ВЗН-регистром) является существенное влияние разброса параметров емкостей ВЗН-сумматоров на итоговое изображение, что делает необходимой процедуру одноточечной коррекции (рис. 7).

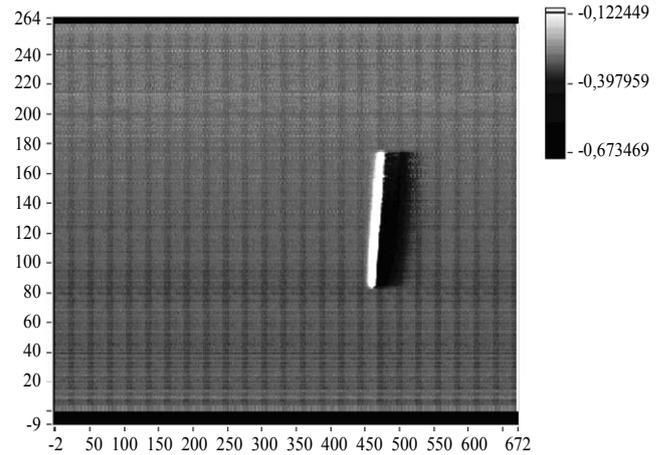


Рис. 7. Экспериментально полученное изображение объекта на однородном фоне до процедуры одноточечной коррекции

Осуществление данной процедуры нежелательно в ряде применений в связи с необходимостью использования дополнительных объемов памяти внутри блока обработки сигналов.

### Заключение

В работе проанализированы выходные характеристики многорядного МФПУ при двух различных способах реализации режима ВЗН внутри БИС-считывания: на основе аналогового ВЗН-регистра и на основе матрицы ВЗН-сумматоров.

Использование ВЗН-регистра при  $N \geq 10$  и  $K_{nep} \leq 0,99$  приведет к понижению амплитуды сигнала больше чем на 7 %, а значения граничной частоты — более чем на 5 % по сравнению со случаем  $K_{nep} = 1$ . Использование ВЗН-регистра для  $N \leq 6$  и  $K_{nep} \geq 0,99$  приведет к понижению граничной частоты менее, чем на 2,5 %, что является приемлемым в ряде задач. Таким образом, количество ФЧЭ в составе ВЗН-канала ограничивается физико-топологическими параметрами БИС-считывания (и, соответственно, значением  $K_{nep}$ ) и определяется для каждой конкретной задачи в соответствии с характеристиками, представленными на рис. 6.

Использование матрицы ВЗН-сумматоров позволяет избежать ухудшения характеристик режима ВЗН, связанных с многократным переносом зарядов. Вклад БИС в пространственное разрешение становится независимым от количества ФЧЭ в составе ВЗН-канала ( $f_{zp} = 26$  пар линий/мм в соответствии с рис. 6). Отсутствие потери заряда в процессе ВЗН-суммирования положительно сказывается на амплитуде итогового сигнала: возрастание сигнала происходит в  $\approx N$  раз. Недостатком данного способа является наличие периодической

амплитудной модуляции выходного сигнала, устраняемой с помощью процедуры односточечной коррекции. В ряде применений осуществление процедуры односточечной коррекции нежелательно, т. к. приводит к необходимости наличия дополнительных объемов памяти в составе блока обработки сигналов.

Третьим способом реализации режима ВЗН является цифровое ВЗН-суммирование [9]. Данный способ позволяет устранить как проблемы, связанные с неполным переносом заряда в ВЗН-регистре, так и с периодической амплитудной модуляцией в случае ВЗН-регистра. Недостатком данного метода является существенное усложнение БИС-считывания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Пер. с франц. — М.: Мир, 1988.
6. Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 55.
7. Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 54.
8. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 83.

## Investigation of the TDI algorithm influence on FPA output characteristics

K. V. Kozlov<sup>1,2</sup> and P. A. Kuznetsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received May 18, 2015

*An influence of the time delay integration (TDI) algorithm on output characteristics of a focal plane array (FPA) is investigated. The spatial resolution and signal amplitude were used as output signals parameters. Two methods of TDI implementation are showed. The first method is using a TDI-register and the second — a matrix of summators. The dependence between the spatial resolution and the charge transfer coefficient of TDI-register is showed. The complex method of choosing TDI register parameters is discovered. The comparison of two methods is showed.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

*Keywords:* TDI, FPA, photodetector, multiplexer.

## REFERENCES

1. M. A. Trishenkov, *Photoreceiver Devices and CCD* (Radio Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base.* (Fizmatkniга, Moscow, 2011) [in Russian].
3. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).
4. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).
5. Gilbert Gaussorgues. *La Thermographie Infrarouge.* (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).
6. K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kuznetsov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 55 (2014).
7. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 54 (2014).
8. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 606 (2013).
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 83 (2015).