

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

К статье
«Получение высокочистых
гранулированных металлов:
кадмия, цинка и свинца»



1—2 2017

ЯНВАРЬ — АПРЕЛЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям

"Ulrich's Periodicals Directory" (США),

в международную систему библиографических ссылок CrossRef,

в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России,

в базу данных DOAJ, в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке

НПП «Сатурн», (г. Киев),

ЧАО «Украналит» (г. Киев),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.

В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.

В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,

тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,

А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2017 № 1–2

Год издания 41-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилъ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

К.т.н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев),
зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

Д.т.н. А. А. Дружинин (г. Львов),

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ефименко (г. Одесса),
зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин (г. Днепр)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

К.т.н. П. С. Сафронов (г. Одесса),
отв. секретарь редколлегии

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное
предприятие «Сатурн»

Одесский национальный
политехнический университет
Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 7 от 28.03 2017 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

СВЧ-техника

Определение технологических параметров изготовления керамических опор замедляющей системы ЛБВ. *В. С. Предмирский, Н. Г. Твердохлеб*

3

Системы передачи и обработки сигналов

Повышение точности измерения напряжения негармонического сигнала в условиях аддитивной помехи. *И. В. Горбатый* (на украинском)

7

Аппаратно-программная реализация системы сбора данных для импульсного спектрометра ЯКР. *А. П. Самила* (на украинском)

16

Биомедицинская электроника

Генератор для электротерапии и стимуляции нервных центров человека. *В. Е. Бабелюк, Ю. Г. Добровольский, И. Л. Попович, И. Г. Корсунский*

23

Сенсоэлектроника

Исследование электрических и магнитных характеристик высокотемпературных датчиков Холла на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN. *В. Р. Стемпичий, Дао Динь Ха*

28

Функциональная микро- и нанoeлектроника

ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением. *В. П. Рева, С. В. Коринец, А. Г. Голенков, С. В. Сапон, А. М. Торчинский, В. В. Забудский, Ф. Ф. Сизов*

33

Обеспечение тепловых режимов

Критериальный подход к поиску токовых режимов работы термоэлектрических устройств повышенной надежности. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв*

38

Влияние основных ограничивающих факторов на пределы теплопереноса в тепловых трубах с различными теплоносителями. *Р. С. Мельник, Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, Е. С. Алексеик*

47

Технологические процессы и оборудование

Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца. *А. П. Щербань, Г. П. Ковтун, Ю. В. Горбенко, Д. А. Солопихин, В. Д. Вирич, Л. А. Пироженко*

55

Указатель статей, опубликованных в 2016 г.

61

Список рецензентов номера

64

ЗМІСТ

НВЧ-техніка

Оцінювання технологічних параметрів виготовлення керамічних опор сповільнюючої системи ЛБХ. *В. С. Предмирський, М. Г. Твердохліб* (3)

Системи передавання та обробки сигналів

Підвищення точності вимірювання напруги негармонічного сигналу в умовах адитивної завади. *І. В. Горбатий* (7)

Апаратно-програмна реалізація системи збору даних для імпульсного спектрометра ЯКР. *А. П. Саміла* (16)

Біомедична електроніка

Генератор для електротерапії та стимуляції нервових центрів людини. *В. Є. Бабелюк, Ю. Г. Добровольський, І. Л. Попович, І. Г. Корсунський* (23)

Сенсоелектроніка

Дослідження електричних і магнітних характеристик високотемпературних датчиків Холла на основі гетероструктур AlGaIn/GaN. *В. Р. Стелтицький, Дао Динь Ха* (28)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

ПЗЗ-фотоматриці з електронним множенням. *В. П. Рева, С. В. Корінець, О. Г. Голєнков, С. В. Сапон, А. М. Торчинський, В. В. Забудський, Ф. Ф. Сизов* (33)

Забезпечення теплових режимів

Критеріальний підхід до пошуку струмових режимів роботи термоелектричних пристроїв підвищеної надійності. *В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов* (38)

Вплив основних обмежуючих факторів на границі теплопереносу в теплових трубах з різними теплоносіями. *Р. С. Мельник, Ю. Є. Ніколаєнко, В. Ю. Кравець, Є. С. Алексєйк* (47)

Технологічні процеси та обладнання

Одержання високочистих гранульованих металів: кадмію, цинку, свинцю. *О. П. Щербань, Г. П. Ковтун, Ю. В. Горбенко, Д. О. Солоніхін, В. Д. Вірич, Л. О. Пироженко* (55)

CONTENTS

Microwave engineering

Experimental estimation of technology parameters of TWT slow-wave structure elements manufacture. *V. S. Predmirskiy, N. G. Tverдохleb* (3)

Signals transfer and processing systems

Improving measuring accuracy of inharmonic signal voltage under the additive noise condition. *I. V. Horbatyi* (7)

Hardware and software implementation of data acquisition system for pulsed NQR spectrometer. *A. P. Samila* (16)

Biomedical electronics

Generator for electrotherapy and stimulation of human nerve centers. *V. E. Babelyuk, Yu. G. Dobrovolskiy, I. L. Popovich, I. G. Korsunskiy* (23)

Sensors

Investigation of electric and magnetic characteristics of high-temperature Hall sensor based on AlGaIn/GaN heterostructure. *V. R. Stempitsky, Dao Dinh Ha* (28)

Functional micro- and nanoelectronics

CCD photomatrixes with electron multiplication. *V. P. Reva, S. V. Korinets, A. G. Golenkov, S. V. Sapon, A. M. Torchinsky, V. V. Zabudsky, F. F. Sizov* (33)

Thermal management

Criterial approach to finding the current operation modes of high reliability thermoelectric devices. *V. P. Zaikov, V. I. Meshcheryakov, Yu. I. Zhuravlyov* (38)

The influence of the key limiting factors on the limitations of heat transfer in heat pipes with various working fluids. *R. S. Melnyk, Yu. E. Nikolaenko, V. Yu. Kravets, Ye. S. Alekseik* (47)

Production technology and equipment

Production of high purity granular metals: cadmium, zinc, lead. *A. P. Shcherban, G. P. Kovtun, Y. V. Gorbenko, D. A. Solopikhin, V. D. Virich, L. A. Pirozhenko* (55)

В. С. ПРЕДМИРСКИЙ¹, к. т. н. Н. Г. ТВЕРДОХЛЕБ²

Украина, г. Киев, ¹НИИ «Орион», ²Государственный университет телекоммуникаций
E-mail: ndiorion@tsua.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ОПОР ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛБВ

Определен перечень технологических параметров и режимы механической обработки керамических опорных стержней для ламп бегущей волны. Разработанная система экспериментов позволяет определять данные, необходимые для расчета прочности сцепления (за счет прослойки жидкости) стержня в процессе механической обработки.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), опорные стержни, керамика, пористость, механическая обработка, сила трения, сила молекулярного прилипания, смачивание.

Повышение выходной мощности широкополосной лампы бегущей волны (ЛБВ) связано с тепловой устойчивостью ее замедляющей системы (ЗС). Поскольку теплопроводность керамических стержней существенно зависит от степени пористости керамики, для сборки замедляющих систем важно отобрать опорные стержни с невысокой пористостью. В [1] предложено решение, позволяющее в процессе шлифовки осуществлять автоматическую отбраковку некачественных, с точки зрения пористости, стержней. Суть этого решения заключается в следующем. Стержень удерживается в оправке для шлифования силами молекулярного сцепления с прослойкой охлаждающей жидкости между стержнем и оправкой. Поскольку на эти силы влияет пористость керамики, параметры режимов шлифовки подбираются такими, чтобы усилия, возникающие при шлифовке, сбрасывали с оправки стержни с недопустимо высокой пористостью, а качественные удерживались на оправке.

В настоящей работе определена система технологических параметров, обеспечивающих шлифование керамических опорных стержней с заданной точностью, а также получены соотношения, позволяющие количественно оценивать прочность прилипания стержня к поверхности оправки.

Определяющими формулами, на основе которых можно судить о прочности крепления опорного стержня к оправке для шлифовки, являются [1]

$$T_{zy} = T_{ш} \left(1 - \frac{h_{ш}}{a} \right) - \mu_{oc} \left(\sqrt{2 \frac{h_{ш}}{a} T_{ш}} + Q \right) \sin ; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_z &= Q \cos \beta + 2 \frac{h_{ш}}{d} T_{ш}^{(1)} = \\ &= Q \cos \beta - 2 \frac{h_{ш}}{d} T_{ш} \left(1 - \frac{h_{ш}}{a} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для использования этих формул для расчетов необходимо проанализировать, какие величины следует задавать, а какие определять экспериментально.

Заданными величинами считаются глубина шлифования $h_{ш}$, радиус круга шлифования a , угол наклона β плоскости контакта стержня с оправкой к плоскости горизонта, длина стержня d и его вес Q . Неизвестными являются коэффициент сухого трения керамики и стали μ_{oc} , усилие шлифования $T_{ш}$, сила трения стержня о смачиваемую поверхность контакта T_{zy} , нормальное усилие T_z (усилие молекулярного прилипания стержня к поверхности оправки в предположении, что между ними имеется весьма тонкая прослойка воды или охлаждающей жидкости) (рис. 1).

При выполнении технических расчетов вводятся системы отсчета, которые являются наиболее удобными. При плоском шлифовании, о котором идет речь, система отсчета выбирается так, как это изображено на рис. 2. Относительно нее обычно и задаются составляющие силы резания при шлифовании. Для вычисления этих составляющих можно использовать ряд формул [2–4]. Ниже приводятся лишь те формулы, которые относятся к шлифованию керамики.

Измерение сил, возникающих при шлифовании, можно проводить различным путем [2]:
— по расходуемой мощности;

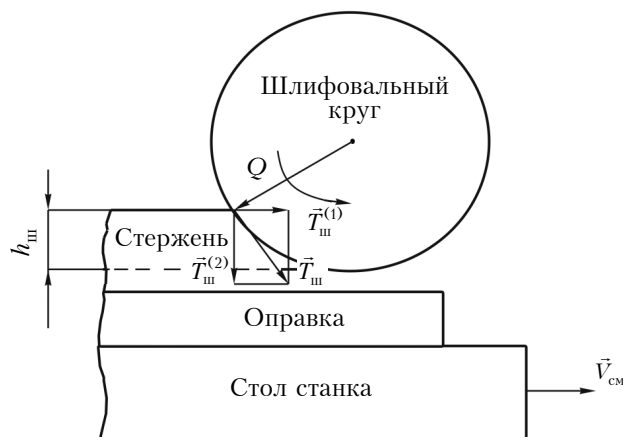


Рис. 1. Схема сил, действующих на стержень в начальный момент шлифования

— по жесткости и упругой системе «деталь — шпиндельная головка»;

— по измеренной упругой деформации.

Если известна расходуемая мощность, то имеет место формула для определения составляющей силы резания P_z (рис. 2) [2]:

$$P_z = 102N\eta_{\text{э}}\eta_{\text{ст}}/V_{\text{к}}, \quad (3)$$

где N — мощность, измеряемая ваттметром, кВт;

$V_{\text{к}}$ — скорость резания, м/с;

$\eta_{\text{э}}$, $\eta_{\text{ст}}$ — КПД электродвигателя и станка соответственно.

Из рис. 1 и 2 легко убедиться, что $P_z = T_{\text{ш}}^{(2)}$, и тогда, поскольку $T_{\text{ш}}^{(2)} = T_{\text{ш}} \cos \delta$, где $\cos \delta \cong \sqrt{2h_{\text{ш}}/a - h_{\text{ш}}^2/a^2} \cong \sqrt{2h_{\text{ш}}/a}$, можем записать

$$T_{\text{ш}} = \frac{1}{\cos \delta} P_z = P_z \sqrt{\frac{a}{2h_{\text{ш}}}}.$$

Таким образом, имеем приближенную формулу для определения усилия шлифования применительно к рассматриваемой задаче:

$$T_{\text{ш}} \cong \sqrt{\frac{a}{2h_{\text{ш}}}} \frac{102N\eta_{\text{э}}\eta_{\text{ст}}}{V_{\text{к}}}. \quad (4)$$

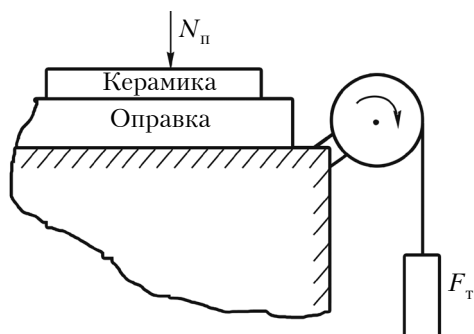


Рис. 3. Принципиальная схема эксперимента по определению силы трения

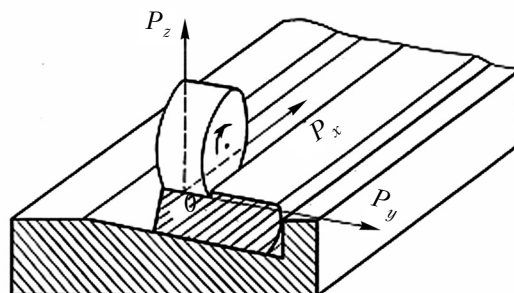


Рис. 2. Схема системы отсчета при плоском шлифовании

Приведем формулы, на основе которых можно определять остальные величины, входящие в основные соотношения (1), (2).

Исходя из фундаментальной формулы Д. В. Дерягина, сила трения определяется как [4, 5]

$$F_{\text{т}} = \mu(N_{\text{о}} + N_{\text{п}}), \quad (5)$$

где μ — коэффициент трения;

$N_{\text{о}}$ — сила молекулярного прилипания;

$N_{\text{п}}$ — сила прижатия образца (рис. 3).

По экспериментальным данным строится зависимость $F_{\text{т}} = f(N_{\text{п}})$, аналогичная показанной на рис. 4. На основе ее анализа можно получить следующую информацию:

а) для случая когда поверхность контакта керамики и оправки сухая, получаем коэффициент сухого трения $\mu_{\text{ос}}$, входящий в полученную эмпирическим путем формулу (1):

$$\mu_{\text{ос}} = \operatorname{tg} \alpha_0; \quad (6)$$

б) для случая когда указанная поверхность контакта смочена охлаждающей жидкостью, можно вычислить силу трения $F_{\text{т}}$ и, разделив ее на площадь контакта $S_{\text{к}}$, найти удельное значение силы трения

$$P_{\text{т}} = F_{\text{т}}/S_{\text{к}}; \quad (7)$$

в) зная $P_{\text{т}}$, можно вычислить величину T_{zy} , входящую в формулу (1):

$$T_{zy} = P_{\text{т}} F_{\text{т}}; \quad (8)$$

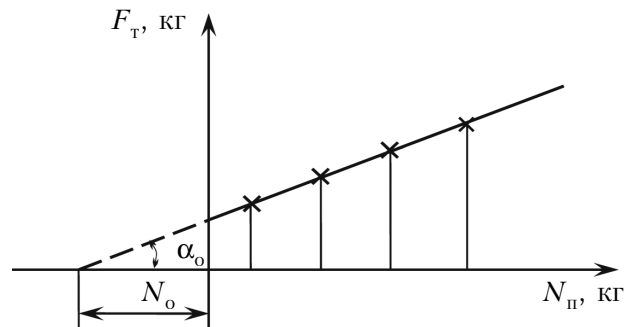


Рис. 4. Зависимость силы трения от силы прижатия образца

г) экстраполируя согласно Д. В. Дерягину график зависимости $F_T = f(N_{\text{п}})$ в область отрицательных значений $N_{\text{п}}$, получим силу прилипания N_o , затем удельную силу прилипания $P_{\text{пр}} = N_o / S_{\text{обр}}$ и далее нормальное усилие T_z , входящее в формулу (2):

$$T_z = P_{\text{пр}} F_T. \quad (9)$$

Таким образом, приведена система необходимых экспериментов и формул, позволяющая рассчитывать прочность соединения стержня с оправкой.

Для определения коэффициентов трения керамики по стали для сухих и смоченных жидкостью поверхностей были проведены соответствующие эксперименты с использованием дискообразных кольцевых образцов из керамики и стали. Образцы в испытательной машине были размещены на одной оси вращения, причем один из образцов оставался неподвижным, а второй прижимался к первому специальным устройством до тех пор, пока величина крутящего момента не преодолевала силу трения покоя.

На рис. 5, а приведен полученный экспериментально график зависимости силы трения от уси-

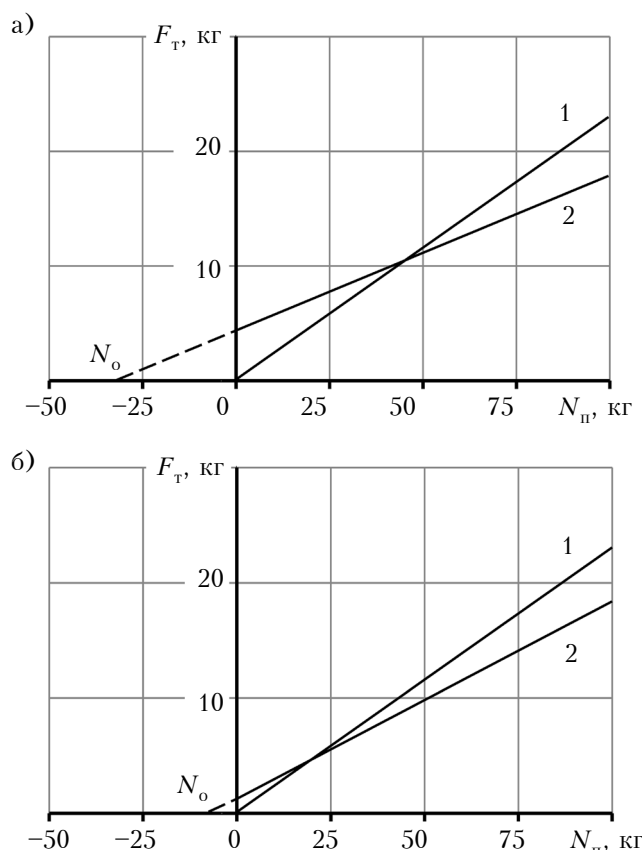


Рис. 5. Графики зависимости силы трения от усилия прижатия дискообразных образцов, полученные при первичном (а) и повторном (б) экспериментах: 1 — контактирующие поверхности сухие; 2 — смочены водой

лия прижатия (величины входят в формулу (5)) на начальном этапе, т. е. когда контактные поверхности обильно смочены водой (кривая 2), и для сравнения — график, полученный при тех же усилиях прижатия без смачивания (кривая 1). Из этих графиков определяем угол α_o , а затем и коэффициент трения керамики на сухой и смоченной поверхностях оправок из стали в соответствии с формулой (6): $\mu_{\text{ос}} \approx 0,2$; $\mu_{\text{смоч}} \approx 0,127$.

Из графика также определим силу прилипания применительно к рассматриваемым образцам: $N_o = 29$ кг. Поскольку внутренний (d_1) и внешний (d_2) диаметры дискообразных кольцевых образцов равны, соответственно, 3,6 и 4,0 см, площадь контакта будет равна

$$S_k = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \approx 2,39 \text{ см}^2.$$

Теперь можем определить удельное значение силы прилипания:

$$P_{\text{пр}} = N_o / S_k \approx 12,1 \text{ Н/см}^2.$$

В конце проведения первого эксперимента вода была почти полностью вытеснена из области контакта. После этого усилие прижатия снижалось, а образец некоторое время оставался в испытательной машине, после чего проводилось повторное испытание. Его результаты представлены на рис. 5, б. Сопоставление приведенных здесь графиков показывает, что даже при минимальном количестве жидкости в плоскости контакта сила трения в среднем на 8% меньше, чем при сухом контактировании, а сила прилипания меньше почти в 6 раз. Это объясняется наличием микропор в керамике, в которых сохраняется охлаждающая жидкость (вода). То есть непрерывное смачивание поверхности контакта позволяет при определенном уровне прижатия обеспечивать прилипаемость керамики к стальной оправке (см. рис. 5, а).

Таким образом, определен перечень технологических параметров и режимов механической обработки керамических опорных стержней, требующих экспериментального определения, а также параметров, которые должны быть заданы. Применение полученных экспериментальных данных позволяет повысить точность изготовления керамических опор и снизить возможность попадания опор с недопустимо высокой пористостью на сборку замедляющих систем спиральных ЛБВ и тем самым существенно увеличить процент выхода годных устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Предмировский В. С., Твердохлеб Н. Г., Бондарчук А. П. Физико-математическая модель технологического процесса изготовления элементов замедляющей системы ЛБВ // Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. «Радиотехника». — 2008. — Вып. 155. — С. 196 — 202.

2. Хрульков В. А., Тародей В. А., Голевань Н. Я., Бук Ю. М. Механическая обработка деталей из керамики и металлов. — Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975.

3. Справочник технолога-машиностроителя. — Москва: Машиностроение, 1969.

4. Лурьев Г. В. Шлифование металлов. — Москва: Машиностроение, 1985.

5. Крачельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. — Москва: Матиа, 1955.

6. Абрикосова И. И. Исследование сил молекулярного притяжения между твердыми телами // Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. — Москва: Институт физической химии АН СССР, 1955.

7. Маслов Е. Н. Основы теории шлифования металлов. — Москва: Матиа, 1951.

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.01 2017 г.

В. С. ПРЕДМИРСЬКИЙ¹, к. т. н. М. Г. ТВЕРДОХЛІБ²

Україна, м. Київ, ¹НДІ «Оріон», ²Державний університет телекомунікацій

E-mail: ndiorion@tsua.net

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ОПОР СПОВІЛЬНЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ЛБХ

У процесі випробування ламп біжучої хвилі встановлено пряму залежність теплопровідності сповільнюючої системи від точності виготовлення і пористості керамічних опорних стрижнів. Це дозволило визначити необхідність підвищення точності їх виготовлення і відбраковування по пористості.

В роботі вирішено задачу кріплення керамічних стрижнів в процесі їх оброблення за допомогою охолоджуючої рідини замість клейового прошарку.

Визначено перелік технологічних параметрів і режимів механічного оброблення опорних стрижнів, утримуваних силами молекулярного зчеплення. Розроблена система експериментів дозволила визначати параметри обробки, необхідні для розрахунку міцності зчеплення (за рахунок прошарку рідини) керамічного опорного стрижня з оправкою в процесі механічного оброблення.

Ключові слова: лампа біжучої хвилі (ЛБХ), опорні стрижні, кераміка, пористість, механічна обробка, сила тертя, сила молекулярного прилипання, змочування.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.03

V. S. PREDMIRSKYI¹, Ph.D. N. G. TVERDOHLEB²

UDC 621.385.632.12

Ukraine, Kyiv, ¹Research institute "Orion", ²State university of telecommunications

E-mail: ndiorion@tsua.net

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF TECHNOLOGY PARAMETERS OF TWT SLOW-WAVE STRUCTURE ELEMENTS MANUFACTURE

During the test of traveling wave tubes it was ascertained the direct dependence of the thermal conductivity of the slow wave structure from accuracy of manufacturing and from porosity of ceramic support rods. It is allowed to define the need to improve the accuracy of their production and the presorting by porosity.

In this paper it is solved the problem of fastening of the ceramic rods in the process of processing by coolant instead of adhesive layer. The list of technological parameters and modes of machining support rods held by molecular cohesion forces are defined.

The developed system of experiments allowed to determine the processing parameters required for the calculation of the bond strength (due to the liquid layer) of the ceramic support rod with a mandrel in the process of machining. This makes possible to determine the technological process parameters of ceramic supporting bars polishing for TWT slow-wave structure. It is shown the possibility of power approach to the estimation of process parameters.

Keywords: thermoelectric converters, thermoelectric source of electricity, electronic medical thermometer.

REFERENCES

1. Predmirskiy V. S., Tverdohleb N. G., Bondarchuk A. P. [Physical and mathematical model of technological process of manufacturing the TWT slow wave system]. *All-Ukrainian Scientific Interdepartmental Magazine "Radiotekhnika"*, 2008, iss. 155, pp. 196-202. (Rus)

2. Hrulkov V.A., Taroday V.A., Golevan N.Ya., Buk U.M. *Mekhanicheskaya obrabotka detalei iz keramiki i metallov* [Machining of details from ceramics and metals]. Saratov, Publishing house of Saratov University, 1975, 380 p. (Rus)

3. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of technologist-machine builder]. Moscow, Mechanical Engineering, 1969, 174 p. (Rus)

4. Luriev G.V. *Shlifovanie metallov* [Grinding of metals]. Moscow, Mechanical Engineering, 1985. 495 p. (Rus)

5. Crachelskiy I.V., Vinogradova I.E. *Koeffitsienty treniya* [Coefficients of friction]. Moscow, Matia, 1955, 187 p. (Rus)

6. Abricosova I.I. [The study of the molecular attraction forces between solid bodies]. Abstract of the thesis of the technical sciences candidate. Moscow, Institute of Physical Chemistry of the Academy of Sciences of the USSR, 1955, 15 p. (Rus)

7. Maslov E.N. *Osnovy teorii shlifovaniya metallov* [Fundamentals of metal grinding theory]. Moscow, Matia, 1951, 177 p. (Rus)

Д. т. н. І. В. ГОРБАТИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»
E-mail: giv@polynet.lviv.ua

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ НЕГАРМОНІЧНОГО СИГНАЛУ В УМОВАХ АДИТИВНОЇ ЗАВАДИ

Розглянуто основні відомі методи вимірювання напруги сигналу. Проаналізовано використовувані схемотехнічні рішення при побудові цифрових вольтметрів і виявлено їх переваги та недоліки. Запропоновано вдосконалити метод безпосереднього оцінювання напруги змінного струму застосуванням розробленого способу вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму та пристрою для його здійснення. Встановлено, що використання вдосконаленого методу забезпечує підвищення точності вимірювання напруги негармонічного сигналу в умовах адитивної завади. Описано схемотехнічні рішення, що використані при виготовленні цифрового мультиметра з використанням удосконаленого методу.

Ключові слова: метод вимірювання, напруга, змінний струм, цифровий вольтметр, точність вимірювання, негармонічний сигнал.

Будь-який науковий експериментальний результат можна вважати достовірним за умови, що він отриманий із використанням засобів вимірювальної техніки, які забезпечують необхідну точність вимірювань. Вимірювання технічних параметрів чи характеристик технічних пристроїв та систем у процесі їх розроблення, виробництва або подальшої експлуатації також необхідно здійснювати з використанням відповідних засобів вимірювальної техніки, які забезпечують необхідну точність вимірювань. Таким чином, наявність точних засобів вимірювальної техніки є необхідною для підтвердження достовірності експериментально отриманих наукових чи технічних результатів.

У наш час спостерігається активний розвиток науки та техніки, який є неможливим без відповідного розвитку вимірювальної техніки, зокрема електрорадіовимірювальної. У зв'язку з появою радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, радіотехнічних та телекомунікаційних систем, у яких застосовують нові технічні рішення, виникає необхідність вимірювати електромагнітні характеристики в нових умовах із заданою точністю, зменшити вплив завад на процес вимірювання, скоротити час вимірювання, зменшити вплив людини на результат вимірювання, отримати результат у цифровій формі, придатній для подальшого оброблення за допомогою комп'ютерної техніки. Ці задачі можуть бути вирішені з використанням но-

вих чи вдосконалених засобів цифрової вимірювальної техніки.

Серед електромагнітних величин найчастіше вимірюють напругу сигналів, тому цифрові вольтметри належать до найбільш уживаних засобів вимірювальної техніки. Схемотехніка цифрових вольтметрів постійно вдосконалюється, що пов'язано, наприклад, з необхідністю вимірювати напругу сигналів складної форми (негармонічних сигналів) в умовах завад, що притаманні певним видам телекомунікаційних каналів. Незважаючи на значну кількість публікацій з цього напрямку [1–5], розроблення нових та вдосконалення відомих цифрових вольтметрів із метою підвищення точності вимірювання напруги негармонічних сигналів в умовах адитивних завад залишається актуальною науковою задачею.

Метою цієї роботи є вдосконалення методів та схемотехнічних рішень для підвищення точності вимірювання напруги негармонічного сигналу в умовах адитивної завади.

Відомі методи вимірювання напруги сигналу

Сигнали, які застосовують у радіотехніці та телекомунікаціях, є складними функціями часу, і саме тому можна вважати, що в загальному випадку напруга сигналу також залежить від часу. Доцільно використовувати такі значення напруги, які є характеристиками сигналів довільної форми. Серед них найбільш часто застосовують середньоквадратичне $U_{СК}$ (діюче U_D), пікове U_P

або найбільше абсолютне (амплітудне U_m для гармонічних сигналів), середнє $U_{\text{СЕР}}$ (постійна складова сигналу) та середньовипрямлене $U_{\text{СВ}}$ значення з усіх миттєвих значень напруги $u(t)$ за час накопичення або за період періодичного сигналу T [5, 6]:

$$U_{\text{СК}} = U_{\text{Д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}; \quad (1)$$

$$U_{\text{П}} = \max_T [u(t)]; \quad (2)$$

$$U_{\text{СЕР}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt; \quad (3)$$

$$U_{\text{СВ}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (4)$$

У загальному випадку додатні та від'ємні пікові значення напруги змінного двополярного сигналу є різними.

Діюче, пікове та середньовипрямлене значення напруги певної форми пов'язані між собою через коефіцієнт амплітуди k_a , коефіцієнт форми k_f та коефіцієнт усереднення k_y :

$$k_a = U_{\text{П}} / U_{\text{Д}}; \quad (5)$$

$$k_f = U_{\text{Д}} / U_{\text{СВ}}; \quad (6)$$

$$k_y = k_a k_f. \quad (7)$$

Оскільки напруга $u(t)$ на елементі електричного кола та струм $i(t)$ через цей елемент пов'язані законом Ома, за певних обставин зручніше користуватись поняттями середньоквадратичного $I_{\text{СК}}$ (діючого $I_{\text{Д}}$), пікового $I_{\text{П}}$ (амплітудного I_m для гармонічних сигналів), середнього $I_{\text{СЕР}}$ та середньовипрямленого $I_{\text{СВ}}$ значення струму, які визначають за допомогою співвідношень, аналогічних (1)–(4).

Розглянемо детальніше методи вимірювання напруги сигналу складної форми та їх вплив на точність вимірювання, основними з яких є метод безпосереднього оцінювання та метод порівняння [4–6].

Для вимірювання напруги сигналу складної форми (напруги змінного струму) методом безпосереднього оцінювання її перетворюють в напругу постійного струму, яку далі і оцінюють. Для отримання середньоквадратичних значень напруги змінного струму [7] випрямляють позитивну півхвилю вимірюваної напруги (однопівперіодне випрямлення), яка пропорційна її середньоквадратичному значенню, та вимірюють її значення відносно нульового потенціалу з урахуванням форми сигналу за допомогою масштабного коефіцієнта k_f .

Для сигналу без постійної складової площа, обмежена огинаючою додатної полярності

сигналу й віссю абсцис, та площа, обмежена огинаючою від'ємної полярності сигналу й віссю абсцис, рівні між собою. Оскільки така площа за повний період сигналу дорівнює його середньовипрямленому значенню, для отримання $U_{\text{СВ}}$ синусоїдального сигналу з однаковими амплітудами додатної та від'ємної полярностей достатньо виміряти середньовипрямлене значення, наприклад, додатної полярності сигналу й помножити його на два. Середньоквадратичні значення напруги $U_{\text{СК}}$ періодичних сигналів з однаковими амплітудами додатної та від'ємної полярностей U^+ та U^- , відповідно, можна отримати, збільшивши в k_f разів середньовипрямлене значення таких сигналів. Значення $U_{\text{СК}}$ для синусоїдального сигналу отримують, збільшивши середньовипрямлене $U_{\text{СВ}}$ в $k_f = 1,11$ разів (див. формули (5)–(7)).

Однак метод, що базується на випрямленні однієї півхвилі та вимірюванні її значення, характеризується тим, що при вимірюванні середньоквадратичного значення напруги змінного струму несинусоїдальної форми збільшується похибка вимірювання для сигналів, у яких амплітуди додатної та від'ємної полярностей сигналу неоднакові, наприклад сигналів у вигляді неперервної послідовності прямокутних імпульсів.

При вимірюванні напруги сигналу складної форми (напруги змінного струму) другим вказаним методом її порівнюють зі зразковою напругою відомої величини за допомогою схеми порівняння. На цьому принципі базується, зокрема, відомий спосіб вимірювання середньоквадратичного значення змінної напруги синусоїдальної форми [2], що полягає в порівнянні вхідної синусоїдальної напруги з постійною опорною напругою, коректуванні значення постійної опорної напруги за результатами цього порівняння та вимірюванні значення цієї постійної опорної напруги. При цьому одночасно порівнюють позитивну й негативну півхвилі вимірюваної змінної напруги з, відповідно, позитивною й негативною опорними напругами, що однакові за своїм абсолютним значенням. Це значення дорівнює середньоквадратичному значенню вимірюваної синусоїдальної напруги в момент, коли дорівнює нулю постійна складова напруги, що утворюється шляхом виконання логічної операції «АБО» над імпульсними послідовностями, які формуються в результаті порівняння. При цьому, порівняння вхідної змінної напруги з постійною опорною напругою в момент вимірювання здійснюють на рівні $U_m / \sqrt{2}$, де крутість вхідного сигналу дорівнює $1 / \sqrt{2} \approx 0,707$. Однак використання такого способу обмежується його складністю та тим, що він придатний

лише для вимірювання середньоквадратичного значення змінної напруги синусоїдальної форми.

Важливою характеристикою будь-якого методу вимірювання напруги є його стійкість до впливу завад. У загальному випадку розрізняють адитивні та мультиплікативні завади. При атестації комутованих і виділених телефонних каналів зв'язку на основі симетричних чи коаксіальних ліній зв'язку на процес вимірювання найбільш суттєво впливають промислові завади частотою 50 Гц. У таких каналах також присутні флуктуаційні та імпульсні завади. У радіоканалах суттєвий вплив можуть мати мультиплікативні завади, що спричинюють замирання сигналу.

На результати вимірювання напруги сигналу складної форми з використанням відомих методів впливають завади. Так, розглянутий метод безпосереднього оцінювання напруги характеризується низькою завадостійкістю при дії адитивної низькочастотної завади (зокрема частотою 50 Гц). У такому випадку напруга завади додається до напруги сигналу, що не дає змоги, наприклад, здійснювати вимірювання напруги сигналу та рівня шуму при атестації комутованих і виділених телефонних каналів зв'язку. Вплив мультиплікативних завад у таких каналах менш суттєвий, мінімізувати його можна лише спеціальними методами цифрового оброблення сигналу, що переважно застосовують не у вольтметрах, а в цифрових аналізаторах спектра.

Схемотехнічні рішення при побудові цифрових вольтметрів

У наш час для вимірювання напруги сигналу переважно використовують цифрові вольтметри. За типом вхідних сигналів розрізняють вольметри постійного та змінного струму. За типом перетворення можна виділити цифрові вольметри прямого та врівноважуючого перетворення [5, 6]. Цифрові вольметри прямого перетворення поділяють на прилади із часовим або частотним проміжним перетворенням. Серед них вагоме місце займають інтегруючі цифрові вольметри з підвищеною завадостійкістю. Цифрові вольметри врівноважуючого перетворення по-

діляють на прилади розгортаючого (циклічного) та слідкуючого перетворення.

Цифрові вольметри прямого перетворення найбільш уживані та прості у виконанні. У загальному випадку до складу таких засобів вимірювання входить вхідний пристрій, підсилювач, детектор напруги змінного струму, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), цифровий відліковий пристрій (індикатор) та пристрій сполучення (інтерфейс). Детектор напруги змінного струму призначений для перетворення напруги змінного струму в напругу постійного струму та необхідний лише у вольтметрі змінного струму. Заміною вхідного пристрою вольметр постійного струму може бути перетворений в амперметр постійного струму, а вольметр змінного струму — в амперметр змінного струму. Типова структурна схема цифрового вольметра прямого перетворення зображена на **рис. 1**.

Вхідний пристрій виконують у вигляді високоомного подільника напруги (переважно із вхідним опором 10 МОм) із частотною компенсацією. Вхідний опір підсилювача має бути значно вищим від подільника напруги і забезпечувати необхідний коефіцієнт підсилення в заданому діапазоні частот. АЦП має перетворювати підсилений до необхідного рівня сигнал у цифровий вигляд для подальшого відображення на індикаторі чи передавання інтерфейсом до засобів комп'ютерної техніки для подальшого оброблення.

Цифрову частину вольметра в багатьох випадках виконують у вигляді спеціалізованих інтегральних схем, які задають точність перетворення напруги постійного струму в заданому обмеженому діапазоні допустимих рівнів вхідного сигналу. Крім того, найбільш суттєво на точність вимірювання впливає аналогова частина вольметра, на розроблення якої слід звертати значну увагу. При виготовленні високоомного подільника напруги для досягнення заданого коефіцієнта передавання за напругою в широкому діапазоні частот мають використовуватись високо-точні та високостабільні резистори та конденсатори. При виготовленні шунта для вимірювання сили струму також необхідно забезпечити високу точність його компонентів.

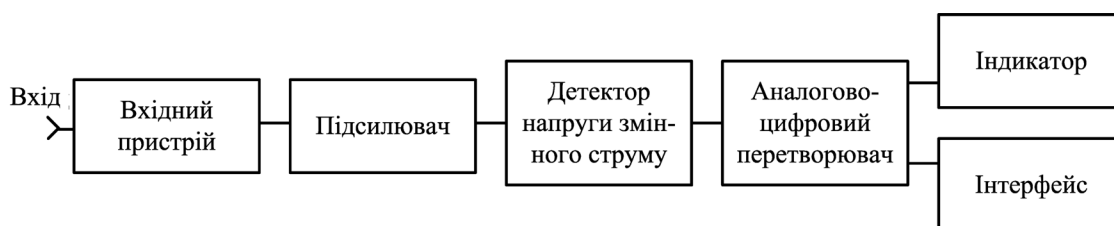


Рис. 1. Типова структурна схема цифрового вольметра прямого перетворення

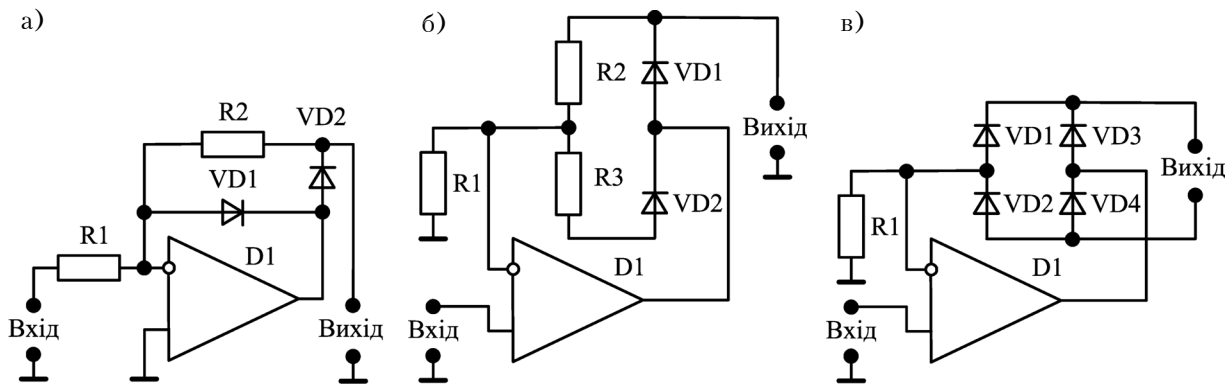


Рис. 2. Варіанти схем детектора середньовипрямленого значення напруги змінного струму

При розробленні аналогової частини цифрового вольтметра найбільшу увагу слід звертати на рішення, використані в схемах підсилювача та детектора напруги змінного струму. Вимоги до підсилювача при вимірюванні напруги постійного струму та напруги змінного струму є різними: у першому випадку дуже важливим є забезпечення малого дрейфу нуля підсилювача, у другому — широка смуга пропускання підсилювача. Тому доцільно ці підсилювачі виконувати у вигляді окремих модулів. Проблеми, що пов'язані з розробленням детектора напруги змінного струму, розглянуто нижче більш детально.

Найбільш уживані варіанти схем детектора напруги змінного струму наведено на **рис. 2**. Серед них найпростішим є однопівперіодний детектор середньовипрямленого значення напруги змінного струму (рис. 2, а) [7], тому саме він знайшов застосування в багатьох вольтметрах. Цей детектор містить операційний підсилювач D1, діоди VD1 та VD2, резистори R1 та R2. Подібну схему використано в однопівперіодному детекторі середньовипрямленого значення напруги змінного струму (рис. 2, б), який, зокрема застосований у універсальному цифровому вольтметрі B7-21A [8]. Однак, як це виходить з описаних недоліків методів вимірювання, детектор, що базується на випрямленні однієї півхвилі та вимірюванні її значення, характеризується великою похибкою вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму несинусоїдальної форми з неоднаковою амплітудою сигналу додатної та від'ємної полярностей. Так, виміряна напруга додатної полярності неперервної послідовності прямокутних імпульсів тривалістю t_i , періодом T , щільністю $Q > 2$ та амплітудою $U_+ > U_-$ буде нижчою за середньоквадратичне значення через особливості роботи детектора при його практичному застосуванні. До того ж, такий пристрій має низьку завадостійкість при дії адитивної низькочастотної завади.

При вимірюванні напруги негармонічних сигналів доцільніше застосовувати двопівперіодний детектор (рис. 2, в), проте на його виході необхідно використовувати АЦП із диференціальним входом. Крім того, чутливість такого детектора є меншою, ніж у однопівперіодного детектора, оскільки має місце спад напруги сигналу на виході операційного підсилювача на двох послідовно включених діодах для кожної (додатної та від'ємної) півхвилі сигналу на відміну від спаду напруги на одному діоді в однопівперіодному детекторі.

Для побудови детектора напруги змінного струму відомі також інші, складніші, схемні рішення, зокрема з використанням декількох операційних підсилювачів [7].

Цифрові вольтметри врівноважуючого перетворення можуть бути побудовані, зокрема, за наведеною на **рис. 3** схемою з використанням відомого пристрою для вимірювання середньоквадратичного значення змінної напруги синусоїдальної форми [2]. Однак такий вольтметр придатний лише для вимірювання середньоквадратичного значення змінної напруги синусоїдальної форми та достатньо складний.

Таким чином, проведений аналіз вказує на те, що існує потреба в удосконаленні відомих ме-

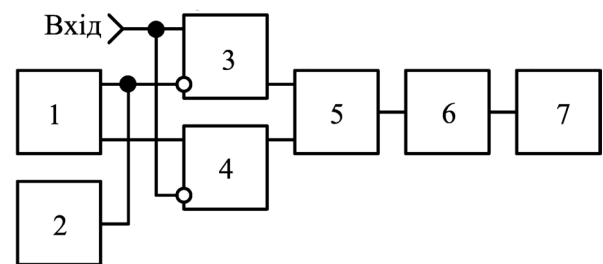


Рис. 3. Структурна схема детектора напруги змінного струму на основі врівноважуючого перетворення: 1 — генератор опорних напруг; 2 — вимірювач постійної напруги; 3, 4 — компаратори; 5 — логічний елемент «АБО»; 6 — інтегратор; 7 — нуль-індикатор

тодів та схемотехнічних рішень для вимірювання напруги змінного струму з метою підвищення точності вимірювання напруги негармонічного сигналу в умовах адитивної завади.

Підвищення точності вимірювання напруги негармонічного сигналу в умовах адитивної завади

За результатами проведених досліджень було запропоновано вдосконалити метод безпосереднього оцінювання напруги змінного струму застосуванням розробленого способу вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму та пристрою для його здійснення [9]. Це забезпечить точне вимірювання середньоквадратичних значень напруги сигналів синусоїдальної форми та інших періодичних сигналів (з урахуванням коефіцієнта форми вимірюваного сигналу) з однаковими амплітудами додатної та від'ємної полярностей сигналу, а також більш точне вимірювання для сигналів несинусоїдальної форми з різними амплітудами додатної та від'ємної полярностей сигналу, до того ж підвищить завадостійкість при дії адитивної низькочастотної завади.

При застосуванні удосконаленого методу випрямляють додатну та від'ємну півхвилі вимірюваної напруги, які пропорційні її середньоквадратичному значенню, та вимірюють їх значення відносно нульового потенціалу з урахуванням масштабного коефіцієнта, відповідного формі вимірюваної напруги. За допомогою АЦП з диференційним входом визначають різницю значень напруги постійного струму, отриманих у результаті випрямлення додатної та від'ємної півхвиль.

Схема пристрою (детектора напруги змінного струму), принцип дії якого оснований на вдо-

сконаленому методі вимірювання, наведена на **рис. 4**. При його застосуванні для вимірювання середньоквадратичних значень напруги сигналів несинусоїдальної форми з $U_+ \neq U_-$ й щільністю $Q > 2$ спостерігається зменшення точності вимірювання тієї півхвилі, що має більшу амплітуду. Наприклад, у випадку $U_+ > U_-$ при випрямленні додатної півхвилі такого сигналу, на відміну від випрямлення від'ємної півхвилі, конденсатори в згладжуючому фільтрі низької частоти, заряджені імпульсом на виході детектора, повністю розряджуються за період часу $T - t_i$, тобто ще до появи наступного імпульсу. Але оскільки в такому пристрої середньоквадратичне значення напруги змінного струму залежить від результатів вимірювання напруги обох полярностей, точність вимірювання підвищується порівняно з однопівперіодним детектором, до того ж у запропонованій схемі неточність номіналів елементів у фільтрах нижніх частот менше впливає на результати вимірювання.

Запропонований пристрій забезпечує вимірювання напруги сигналу при дії низькочастотної адитивної завади. Зокрема, така завада частотою 50 Гц та амплітудою, яка може перевищувати в декілька разів тестовий сигнал або амплітуду шуму, найбільш часто спостерігається при визначенні амплітудно-частотної характеристики й пропускної здатності каналу зв'язку. Підвищення завадостійкості до адитивної низькочастотної завади пояснюється тим, що в такому пристрої одночасно здійснюють випрямлення як позитивної, так і негативної півхвиль, при цьому адитивна низькочастотна завада додається одночасно з тим же знаком до сигналів, отриманих в результаті випрямлення додатної та від'ємної півхвиль вхідного сигналу.

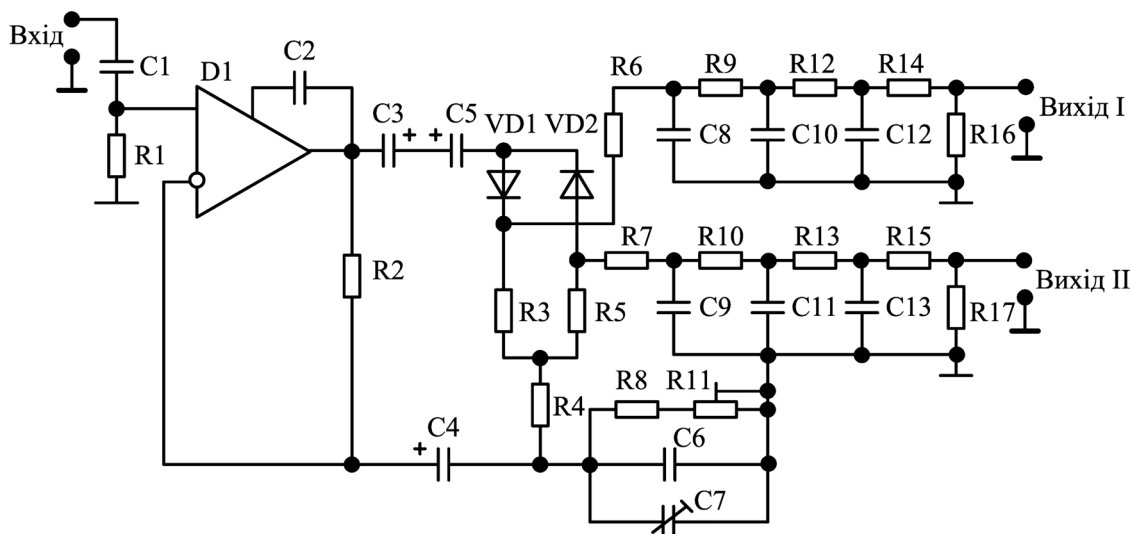


Рис. 4. Електрична принципова схема запропонованого детектора напруги змінного струму

Тому при відніманні напруг сигналів, отриманих у результаті випрямлення, така адитивна завада компенсується. Це дає можливість, наприклад, при атестації комутованих і виділених телефонних каналів зв'язку, а саме при визначенні їх амплітудно-частотних характеристик і пропускних здатностей, виконувати вимірювання середньоквадратичних значень напруги тестового сигналу синусоїдальної форми та рівня шуму (при відсутності тестового сигналу) навіть у випадку, коли амплітуда низькочастотної адитивної завади в декілька разів перевищує амплітуду сигналу або шуму.

Цифровий мультиметр із використанням удосконаленого методу

За результатами проведених досліджень було виготовлено макет мультиметра (рис. 5) для вимірювання напруги та сили постійного струму, напруги та сили змінного струму, опору, ємності,



Рис. 5. Макет мультиметра

індуктивності, спаду напруги на напівпровідникових елементах. Його технічні характеристики наведено в **таблиці** (ВВ — високовольтний, ВЧ — високочастотний).

При побудові макету мультиметра використано наступні схемні рішення.

У підсилювачі напруги постійного струму, схему якого наведено на **рис. 6**, для забезпечення високого входного опору застосовано операційний підсилювач із високим входним опором, що працює в режимі повторювача напруги, підсилювача напруги в 10 разів або атенюатора напруги в 10 разів.

Вибір необхідного коефіцієнта підсилення здійснюють за допомогою сигналів управління реле Упр. 1 та Упр. 2. У підсилювачі передбачено схему корекції нуля. На вході підсилювача є пристрій захисту входного сигналу від високої напруги, що не впливає на входний опір підсилювача при напрузі входного сигналу в межах ± 7 В і витримує пікове значення напруги входного сигналу ± 310 В.

Підсилювач напруги змінного струму (**рис. 7**) для забезпечення високого входного опору містить два каскади: перший каскад із високим входним опором працює в режимі повторювача напруги або атенюатора напруги в 10 разів, другий — в режимі повторювача напруги або підсилювача напруги в 10 разів. Вибір необхідного

Технічні характеристики макета мультиметра

Вимірювана величина		Діапазон вимірювання, у т. ч. з додатковим обладнанням (вказане в дужках)
Напруга постійного струму, В		1·10 ⁻⁵ — 1·10 ³
		10 — 1·10 ⁴ (ВВ-подільник №1)
		1·10 ² — 3·10 ⁴ (ВВ-подільник №2)
Сила постійного струму, А		1·10 ⁻⁸ — 2
		1·10 ⁻² — 20 (шунт)
Напруга змінного струму, В, у різних частотних діапазонах, Гц	20 — 1·10 ⁵	1·10 ⁻⁵ — 1·10 ³
	20·10 ³ — 1·10 ⁸	0,1 — 1,2 (ВЧ-детектор)
	20·10 ³ — 3·10 ⁷	0,1 — 12 (ВЧ-детектор)
	20 — 5·10 ⁴	10 — 1·10 ⁴ (ВВ-подільник №1)
	20 — 3·10 ⁴	1·10 ² — 3·10 ⁴ (ВВ-подільник №2)
Сила змінного струму, А, у частотному діапазоні, Гц	20 — 20·10 ³	1·10 ⁻⁸ — 2
		1·10 ⁻² — 20 (шунт)
Активний опір, Ом		1·10 ⁻² — 2·10 ⁸
Ємність, Ф		1·10 ⁻¹³ — 2·10 ⁻⁴
Індуктивність, Гн		1·10 ⁻⁷ — 200
Напруга на напівпровідниковому елементі, В		1·10 ⁻⁴ — 10

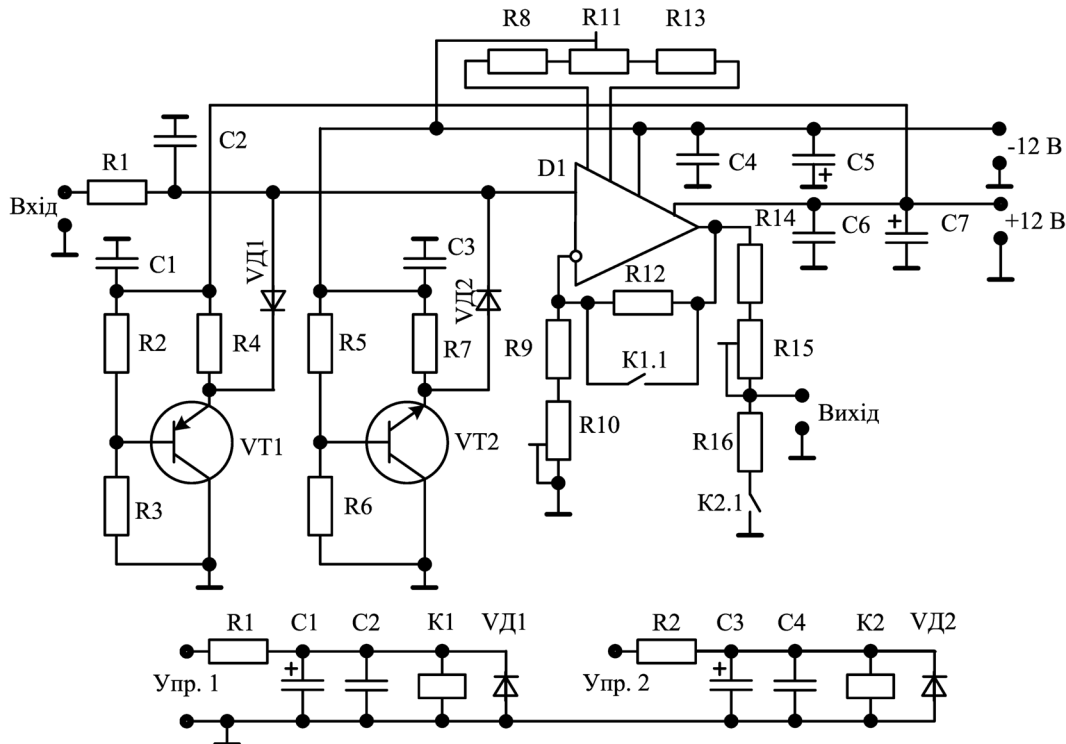


Рис. 6. Електрична принципова схема підсилювача напруги постійного струму

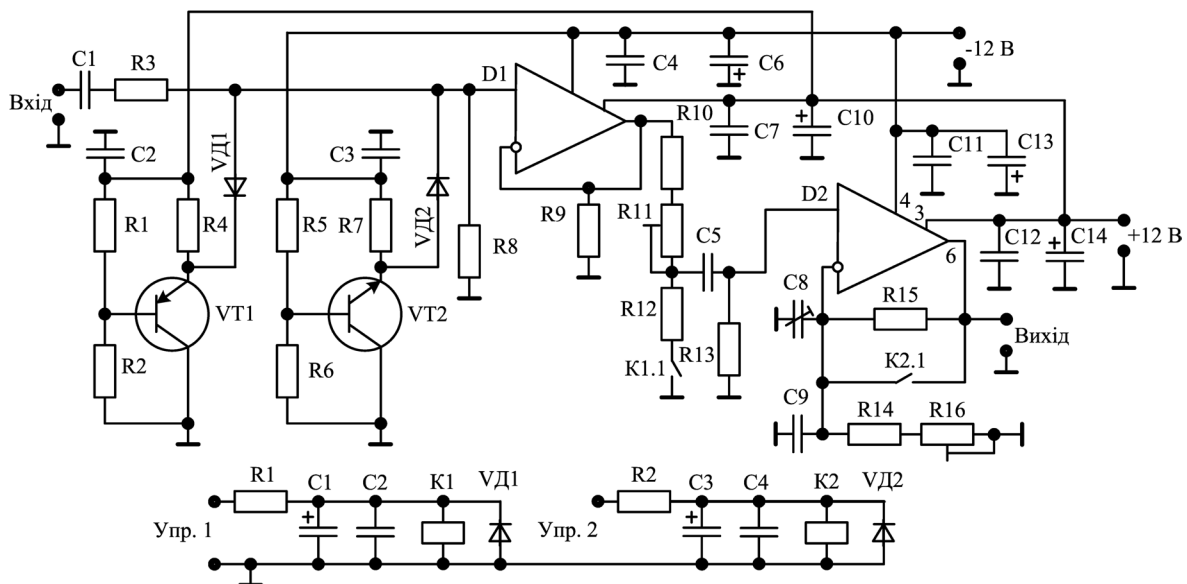


Рис. 7. Електрична принципова схема підсилювача напруги змінного струму

коефіцієнта підсилення здійснюють за допомогою сигналів управління реле Упр. 1 та Упр. 2. На вході підсилювача є пристрій захисту від високої напруги вхідного сигналу, що не впливає на вхідний опір підсилювача при напрузі вхідного сигналу в межах ± 7 В і витримує пікове значення напруги вхідного сигналу ± 310 В.

Для усунення недоліків розглянутих вище схем детекторів напруги змінного струму вдосконалено схему детектора (рис. 2, б) викори-

станням розробленого способу вимірювання напруги змінного струму та пристрою для його здійснення (рис. 3). Запропонований детектор є детектором середніх значень, що проградуєований у середньоквадратичних значеннях напруги змінного струму синусоїдальної форми. У схемі детектора забезпечено диференційний вихід, завдяки чому підвищилась точність вимірювання параметрів послідовностей імпульсів із щільністю, відмінною від 2, а також підвищити

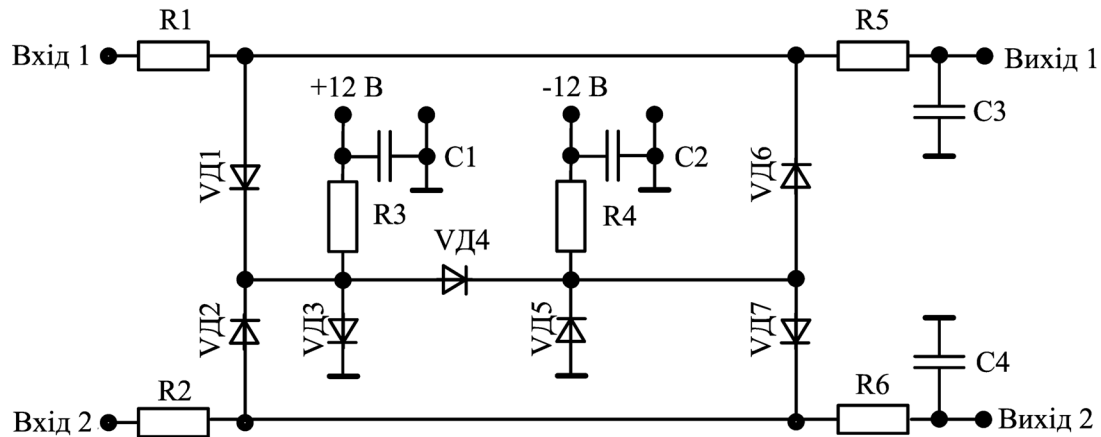


Рис. 8. Електрична принципова схема пристрою захисту входу АЦП

точність вимірювання напруги змінного струму в умовах низькочастотної адитивної завади.

Для вимірювання напруги постійного струму використано АЦП прямого перетворення з подвійним інтегруванням із диференціальним входом в інтегральному виконанні. У режимі перевантаження вхідним сигналом напруга на виході детектора або підсилювача постійної напруги може перевищити допустиму напругу на вході АЦП. Тому на вході АЦП використано розроблений пристрій захисту від високої напруги вхідного сигналу, що не впливає на вхідний опір АЦП при напрузі вхідного сигналу в межах $\pm 0,26$ В і витримує пікове значення напруги сигналу ± 100 В (рис. 8).

Розглянуті складові цифрового вольтметра також використані при вимірюванні сили постійного струму та сили змінного струму, при цьому замість подільника напруги використано набір шунтів.

Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень удосконалено метод безпосереднього оцінювання напруги змінного струму, який дає можливість більш точно, порівняно з відомими методами, оцінювати сигнали негармонічної форми, а при атестації комутованих і виділених телефонних каналів зв'язку виконувати вимірювання в умовах адитивних завад. На його основі побудовано макет мультиметра для вимірювання напруги та сили постійного струму, напруги та сили змінного струму, опору, ємності, індуктивності, спаду напруги на напівпровідникових елементах. Практичне використання макету підтвердило його переваги порівняно із приладами промислового виробництва, такими як універсальний цифровий вольтметр В7-21а та мультиметр у телестеті Ласпи-ТТ-01, зокрема при дослідженні параметрів негармонічних сигналів і дослідженні характеристик симетричних ліній зв'язку в умовах адитивних завад.

метр у телестеті Ласпи-ТТ-01, зокрема при дослідженні параметрів негармонічних сигналів і дослідженні характеристик симетричних ліній зв'язку в умовах адитивних завад.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Kampik M., Laiz H., Klonz M. Comparison of three accurate methods to measure AC voltage at low frequencies // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2000. — Vol. 49, iss. 2. — P. 429. — 433.
2. Пат. 36074 України. Спосіб вимірювання середньоквадратичного значення змінної напруги синусоїдальної форми та пристрій для його здійснення / Г. Ю. Троїшин. — 2001. — Бюл. № 3.
3. Пат. 65555 Україна. Спосіб вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму / Ю.М. Туз, О.М. Кривченкова. — 2011. — Бюл. № 23.
4. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борець Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. — Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2005. — Т. 2. Вимірювальна техніка.
5. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебное пособие / Под ред. Б. Н. Тихонова. — Москва: Горячая линия—Телеком, 2007.
6. Винокуров В. И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов. — Москва: Высшая школа, 1986.
7. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — Ленинград: Энергия. 1980.
8. Вольтметр универсальный В7-21А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, атд2.710.003 ТО. — Каунас : НИИРИТ, 1988.
9. Пат. 62369А України. Спосіб вимірювання середньоквадратичного значення напруги змінного струму та пристрій для його здійснення / І.В. Горбатий. — 2003. — Бюл. № 12.

Дата надходження рукопису
до редакції 13.02 2017 р.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НЕГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОЙ ПОМЕХИ

Рассмотрены основные известные методы измерения напряжения сигнала. Проанализированы используемые схемотехнические решения при построении цифровых вольтметров. Выявлены их преимущества и недостатки. Предложено усовершенствовать метод непосредственного оценивания напряжения переменного тока применением разработанного способа измерения среднеквадратичного значения напряжения переменного тока и устройства для его осуществления. Установлено, что использование усовершенствованного метода обеспечивает повышение точности измерения напряжения негармонического сигнала в условиях аддитивной помехи. Описаны схемотехнические решения, которые использованы при изготовлении цифрового мультиметра с использованием усовершенствованного метода.

Ключевые слова: метод измерения, напряжение, переменный ток, цифровой вольтметр, точность измерения, негармонический сигнал.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.07

UDC 621.37+621.39

I. V. HORBATYI

Ukraine, Lviv Polytechnic National University

E-mail: giv@polynet.lviv.ua

IMPROVING MEASURING ACCURACY OF INHARMONIOUS SIGNAL VOLTAGE UNDER THE ADDITIVE NOISE CONDITION

The basic known methods of signal voltage measuring were considered. The circuit solutions used in the construction of digital voltmeters were analyzed. Their advantages and defects were analyzed. Method of direct assessment of alternating current voltage is proposed to improve by using the developed method for measuring root-mean-square value of alternating current voltage and the device for the realization of the method. It is set, that the use of improved method provides an increase of the inharmonic signal voltage measuring accuracy in conditions of additive noise. Circuit solutions that used for making of digital multimeter using the improved method for measuring of alternating current voltage were described.

Keywords: measuring method, voltage, alternating current, digital voltmeter, measuring accuracy, inharmonic signal.

REFERENCES

1. Kampik M., Laiz H., Klonz M. Comparison of three accurate methods to measure AC voltage at low frequencies // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2000, Vol. 49, Iss. 2, pp. 429–433.
2. Trojanov H.Yu., Trotsyshyn I.V. *Sposib vimiryuvannya seredn'okvadratichnogo znachennya zminnoyi naprugi sinusoidal'noyi formi ta pristirii dlya iogo zdiisnennya* [Method for measurement of root-mean-square value of alternating voltage with sinusoid form and appliance for its implementation]. Patent Ukraine, no 36074, 2001. (Ukr)
3. Tyz Yu. M., Kryvchenkova O. M. [Method for measurement of root-mean-square value of alternating current voltage]. Patent Ukraine, no 65555, 2011. (Ukr)
4. Dorozhovets M., Motalo V., Stadnyk B., Vasyliuk B., Borek R., Kowalczyk A. *Osnovi metrologiyi ta vimiryuval'noyi tekhniki : pidruchnik* [Fundamentals of metrology and measuring technique: textbook]. Lviv: Publishing House of the Lviv National Polytechnic University, 2005, Vol. 2, 656 p. (Ukr)
5. Tikhonov B. N. ed. *Metrologiya i elektroradioizmereniya v telekommunikatsionnykh sistemakh : uchebnoe posobie* [Metrology and electro radio measuring in telecommunication systems : textbook]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom, 2007, 374 p. (Rus)
6. Vinokurov V. I., Kaplin S.I., Petelin I.G. *Elektroradioizmereniya : ucheb. posobie dlya radiotekhnich. spets. vuzov* [Electro radio measuring: textbook for radio eng. spec. of high schools]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 351. (Rus)
7. Gutnikov V.S. *Integral'naya elektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh* [Integrated electronics in measuring devices]. Leningrad, Energy, 1980, 248 p. (Rus)
8. [Universal voltmeter V7-21A. Technical description and operation instruction, atd 2.710.003 TO]. Kaunas, SRIRMT, 1988, 128 p. (Rus)
9. Horbatiy I.V. [Method for measuring root-mean-square value of alternating voltage and the device for the realization of the method]. Patent Ukraine, no 62369, 2003. (Ukr)

К. т. н. А. П. САМІЛА

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: andriysamila@gmail.com

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО СПЕКТРОМЕТРА ЯКР

Запропоновано апаратно-програмну реалізацію компактної системи збору даних для імпульсного спектрометра ядерного квадрупольного резонансу, апаратні рішення якої базуються на мультипротоковому USB245 FIFO перетворювачу FT2232H, що забезпечує передавання даних зі швидкістю до 480 Мб/с. З використанням засобів графічного об'єктно орієнтованого програмування синтезовано віртуальний інструмент LabVIEW для візуалізації та оброблення даних сигналів ядерної спінової індукції.

Ключові слова: віртуальний інструмент, система збору даних, ЯКР, LabVIEW, USB-інтерфейс.

Розроблення експериментальних методів імпульсної Фур'є- та релаксаційної спектроскопії ядерного квадрупольного резонансу (**ЯКР**) є важливою науковою задачею, актуальність якої значною мірою визначається варіативністю прикладного застосування методу ЯКР. Висока точність та інформативність даного методу уможливорює його ефективне впровадження в різні галузі науки та народного господарства: матеріалознавство (дослідження симетрії, структури, фазових переходів та аналіз дефектності кристалів); твердотільна електроніка (контроль структури напівпровідників при створенні на їх основі радіаційно-стійких пристроїв); боротьба з тероризмом та національна безпека (дистанційне виявлення вибухових та наркотичних речовин) та ін. [1–4].

Незначну кількість робіт прикладного характеру з тематики розроблення апаратних методів ЯКР-радіоспектроскопії у дослідженнях вітчизняних науковців можна пояснити складністю апаратури спостереження та реєстрації ядерних резонансних процесів [5–7]. Роботи закордонних науковців підкреслюють актуальність даної тематики і охоплюють широкий спектр досліджень в галузі ЯКР-спектроскопії: розроблення експериментальних методів та апаратури спостереження ЯКР, розвиток апаратно-програмних засобів цифрового оброблення сигналів спінової індукції в реальному часі, дослідження внутрішньомолекулярної структури речовин та їх фізико-хімічних властивостей, розроблення ЯКР-детекторів вибухівки та наркотичних речовин, ЯКР-томографія та

ін. [8–10]. Експериментальними розробками інтенсивно займаються науково-дослідні центри в США, Німеччині, Японії, Китаї, Росії. Незважаючи на це, доступне обладнання для ЯКР-аналізу представлене лише декількома провідними корпораціями: SpinCore, Tescmag, Bruker, Varian та ін. Вартість вимірювальних комплексів досягає сотень тисяч доларів, тому певною мірою утруднює їх використання в науково-дослідних центрах України.

Метою даної роботи є розроблення компактної системи збору даних ЯКР, застосування якої дозволить суттєво знизити вартість необхідного для проведення радіофізичних експериментів обладнання.

Апаратна реалізація системи збору даних

Важливою умовою організації та проведення радіофізичного експерименту є наявність зручної системи збору даних (**СЗД**). У випадку досліджень ЯКР імпульсним методом до СЗД можна сформулювати ряд вимог — висока швидкодія та пропускну здатність, наявність синхронізації запуску імпульсу зондування, можливість проводити багатократні запуски для реалізації цифрового накопичення та усереднення резонансних сигналів [7]. Водночас, невід'ємною складовою СЗД є зручний та універсальний інтерфейс зв'язку з персональним комп'ютером (**ПК**).

Виходячи із зазначених вимог та з широти пропозицій апаратних інтерфейсних рішень, для реалізації СЗД було вибрано мікросхему мультипротокового, двонаправленого USB↔245FIFO

перетворювача FT2232H, що забезпечує передавання даних зі швидкістю до 480 МБ/с [11] та можливість роботи з послідовними і паралельними інтерфейсами. Наявність буферної пам'яті обсягом 8 Кб дозволяє реєструвати в одному циклі 65536 точок, що при швидкості передавання даних 15 МБ/с (режим асинхронного FIFO FT245) еквівалентно часовому інтервалу сигналу спаду вільної індукції тривалістю близько 4,4 мс. Враховуючи те, що ширина спектру ЯКР для більшості атомних ізотопів не перевищує 1 МГц, для реалізації СЗД використано режим асинхронного FIFO FT245, що є цілком достатнім. Другий канал FT2232H використано для передавання службових команд керування радіоспектрометром ЯКР.

Синтез віртуального інструмента LabVIEW

Задача візуалізації та оброблення даних радіофізичного експерименту вирішувалась шляхом створення програмного забезпечення на базі системи автоматизованого проектування (САПР) National Instruments LabVIEW, яка надає широкі можливості для реалізації багатьох вимірювальних приладів та функцій для математичного оброблення результатів вимірювань.

Віртуальний інструмент (ВІ) СЗД синтезовано засобами графічного об'єктно орієнтованого програмування. Вихідним кодом для реалізації ВІ є його блок-схема, яка відображає графічне представлення програмованої задачі. На **рис. 1** показано блок-схему підпрограми ВІ, що забезпечує функцію оброблення масиву даних, отриманих від реального об'єкта з вико-

ристанням USB-інтерфейсу на базі FT2232H та зовнішнього аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і подальшу візуалізацію сигналу спаду вільної індукції (СВІ). Застосування синхронізованого циклу Timed Loop дозволило реалізувати режим багатократного експерименту для цифрового усереднення даних.

Оператори процедур FTDI-пристрою: GDI — зчитування опису; ODD — надання доступу; RD — скидання; T/R — вибір пам'яті; GQS — зчитування числа байтів в буфері; RBD — зчитування байту даних; CD — завершення доступу.

Структура Flat Sequence Structure (верхня частина схеми на рис. 1), яка реалізована на основі бібліотек FTDI, слугує для ініціалізації апаратного USB-пристрою, переведення його в режим приймання та побайтового передавання даних на іншій ВІ циклі Timed Loop.

Сигнал СВІ після дії радіочастотного імпульсу збудження для k -ї резонансної частоти має вигляд експоненційно згасаючого коливання:

$$s(t) = A \sum_{k=1}^d K_k \exp(-[\beta_k + i\omega_k(T)]t) + n(t),$$

де A — загальна магнітуда, величина якої визначається потужністю сигналу збудження;

K_k — масштабний коефіцієнт для амплітуди k -ї компоненти;

β_k — коефіцієнт затухання сигналу, що залежить від тривалості релаксаційних процесів всередині спінової системи;

$\omega_k(T)$ — резонансна частота ЯКР, що залежить від температури T ;

$n(t)$ — шумова складова сигналу СВІ.

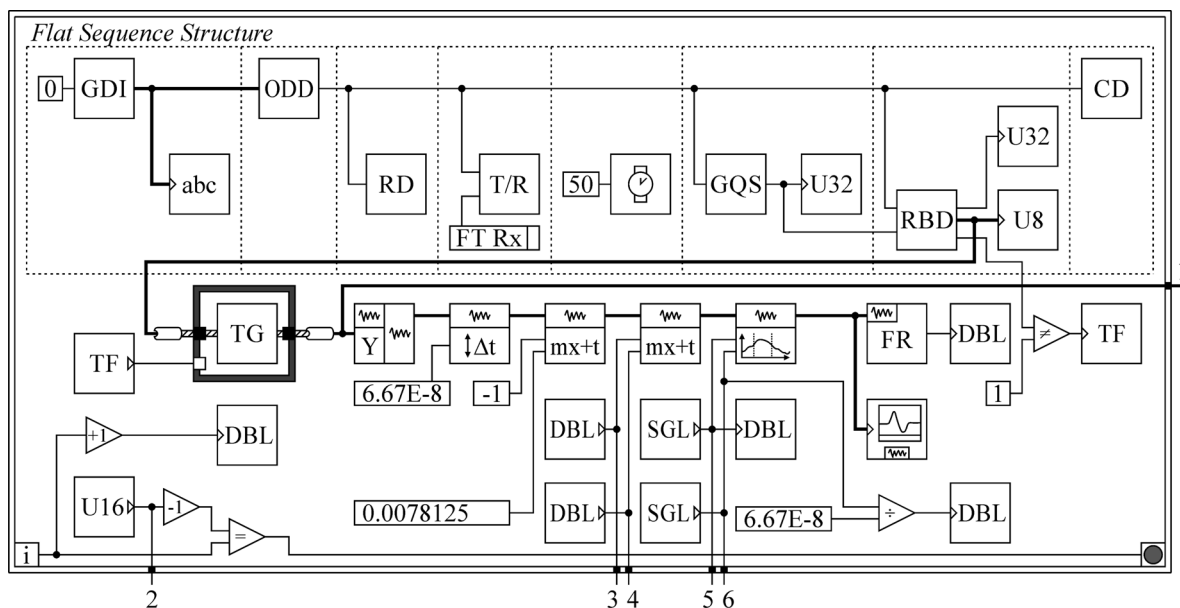


Рис. 1. Блок-схема підпрограми ВІ для зчитування та оброблення масиву експериментальних даних:

abc — термінал ASCII; DBL — термінал чисел подвійної точності; FR — блок визначення несної частоти; SGL — термінал чисел одинарної точності; TF — термінал логічних даних; TG — блок синхронізації; U8(U16) — термінал беззнакових цілих

Комплексний ряд Фур'є дискретизованого сигналу СВІ, представленого послідовністю з N відліків на інтервалі спостереження $T_c = NT_d$, матиме вигляд

$$s_d(t) = T_d \sum_{\kappa=-\infty}^{\infty} \dot{C}_{\kappa} \exp(j \cdot 2\pi \kappa t / T_c), \quad \kappa = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

де T_d — інтервал дискретизації, а комплексні коефіцієнти ряду є комплексними амплітудами спектральних складових:

$$\dot{C}_{\kappa} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi \kappa n / N).$$

Пряме застосування дискретного перетворення Фур'є для N вибірок вимагає збільшення обчислювальних ресурсів ПК. Однак у нашому випадку розмір послідовності задовольняє умові $N = 2^m = 65536$, тому для розрахунку застосовуємо швидко перетворення Фур'є. Для його реалізації з метою візуалізації усередненого сигналу СВІ в частотній області та аналізу окремих складових спектру ЯКР реалізовано блок-схему підпрограми ВІ СЗД (рис. 2). Блок-схема, основою якої є модулі FFT та PS/PSD, дозволяє застосовувати алгоритми віконного цифрового оброблення спектральних характеристик сигналів СВІ (прямокутне, Хеннінга, Хеммінга, Блекмана та інші), а також надає можливість відображення енергетичного спектру ЯКР.

Аналіз амплітудного спектру дискретизованого сигналу передбачає визначення модулів ($C_1, C_2, \dots, C_{N/2}$) і аргументів ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N/2}$) комплексних коефіцієнтів ряду Фур'є та розрахунок миттєвих значень гармонік спектру:

$$s_1(n) = 2C_1 \cos\left(2\pi \frac{n}{N} + \varphi_1\right);$$

$$s_2(n) = 2C_2 \cos\left(4\pi \frac{n}{N} + \varphi_2\right);$$

.....

$$s_{N/2}(n) = C_{N/2} \cos\left(\kappa \cdot 2\pi \frac{n}{N} + \varphi_{N/2}\right).$$

Аналогічно інтервалу T_d в часовій області існує інтервал між компонентами C_{κ} , що визначає роздільну здатність за частотою

$$\Delta f = f_d / N.$$

Сигнал СВІ оцифровується з частотою дискретизації $f_d = 15$ МГц, отже інтервал між N вибірками складає близько $6,67 \cdot 10^{-8}$ с. При постійній f_d частотний інтервал Δf для $N = 65536$ складає 229 Гц і зростає до 0,9 кГц при зменшенні N до 16384 (випадок реєстрації мультиплетних широкосмугових спектрів ЯКР, тривалість СВІ близько 650 мкс) [12].

Графічний інтерфейс віртуального інструмента, синтезованого для СЗД імпульсного спектрометра ЯКР, зображено на рис. 3.

Експериментальні дослідження СЗД

Експериментальні випробування розробленої системи збору даних для імпульсного спектрометра ЯКР проводились в лабораторних умовах із застосуванням тестового сигналу СВІ, характерного для ЯКР ізотопу ^{115}In кристалічної структури InSe. Особливістю даної кристалічної структури є наявність політипних модифікацій, через що спектри ЯКР мають складний мультиплетний характер [12]: число спектральних компонент — 12 ліній, широкий діапазон частот (приблизно 600 кГц), висока роздільна здатність спектру — до 5 ліній на смугу частот 40 — 50 кГц.

Блок-схему лабораторної установки для проведення досліджень зображено на рис. 4. Тестовий сигнал ЯКР ^{115}In , що відповідає спіновому переходу на частоті 20,5 МГц, синтезовано в MATLAB Simulink та завантажено в пам'ять цифрового генератора OWON AG2052F [13]. Для оцифровування сигналу та буферизації даних на апаратний модуль USB-інтерфейсу застосовано відлагоджувальну плату, що містить програмовану логічну інтегральну схему EP1C6Q240C8 та АЦП AD9280ARS [14].

Умовою коректного проведення радіофізичного експерименту є наявність синхронізації між початком робочого циклу СЗД та початком імпульсу зондування ЯКР [6, 7]. Для реалізації задачі синхронізації розроблено конфігураційну структуру на ПЛІС, фрагмент якої зображено на рис. 5. Структура складається з трьох таймерів і забезпечує формування синхроімпульсу запуску ЯКР-спектрометра на її виході у відповідності до надходження на її вхід пакету імпульсів ініціалізації USB-інтерфейсу. Перший таймер встановлює тривалість імпульсу гасіння (5 мкс), необхідного для шунтування входу приймально-го каналу радіоспектрометра під час дії імпульсу зондування та перехідного процесу в котушці спектрометра, другий — тривалість імпульсу синхронізації (1 мкс), третій — тривалість циклу повторення експерименту (500 мс). Модулі LPM Counter слугують лічильниками тактових імпульсів частотою 15 МГц і встановлюють величину часових інтервалів у відповідності до значень числових констант LPM Constant (рис. 5).

В таблиці наведено дані для порівняння технічних характеристик розробленої СЗД з найближчими прототипами. Як видно, застосування запропонованої СЗД в портативних радіоспектрометрах ЯКР дозволить суттєво

Рис. 2. Блок-схема підпрограми ВІ для спектрального аналізу СВІ

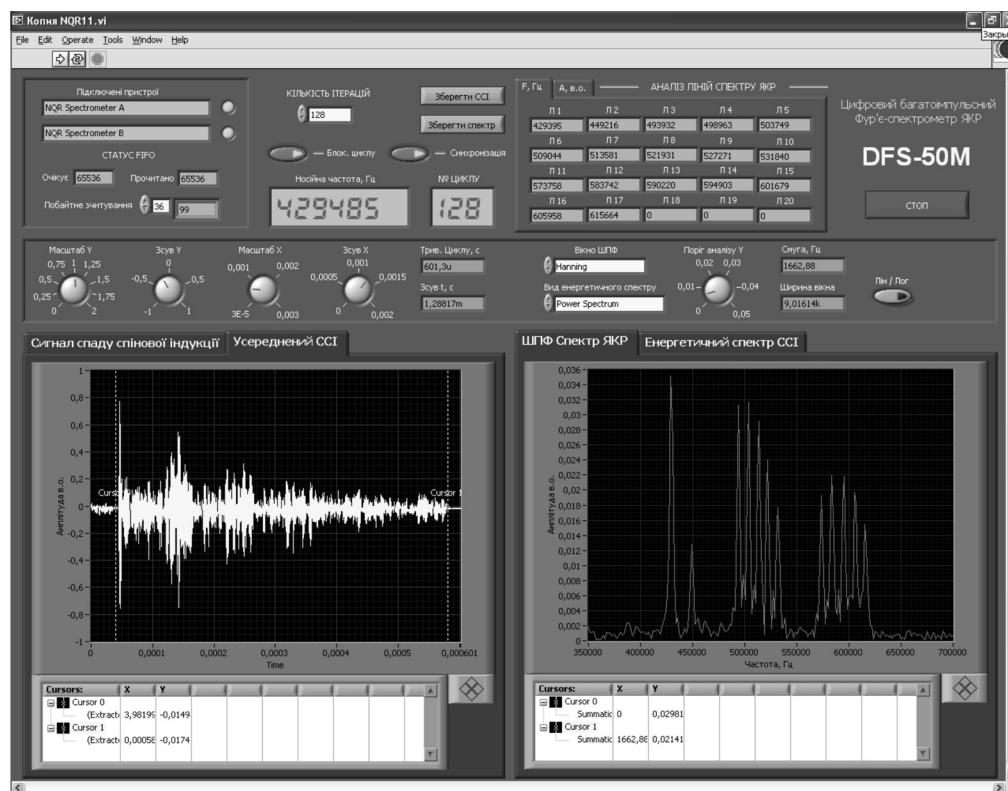


Рис. 3. Графічний інтерфейс віртуального інструмента LabVIEW, розробленого для СЗД імпульсного спектрометра ЯКР

Технічні характеристики розробленої СЗД та її найближчих прототипів

Параметр	Розроблена СЗД	СЗД на базі USB осцилографа BORDO-421 [6]	SpinCore RadioProcessor-G [15]
Частота дискретизації АЦП, МГц	7,5–15*	100	75
Розрядність АЦП, біт	16–8*	10	14
Ширина зарестрованого спектру, МГц	3,75–7,5*	50	9,4
Роздільна здатність за частотою, Гц	229	763	72
Кількість комплексних точок	32768–65536*	65536	16384
Інтерфейс ПК	USB	USB	PCI
Вартість апаратури СЗД, у.о.	50**	365	2500

* Встановлюється програмно у вказаних діапазонах в залежності від параметрів зовнішнього АЦП (визначається умовами експерименту).

** Приблизна вартість комплектуючих та технологічних операцій з виготовлення.

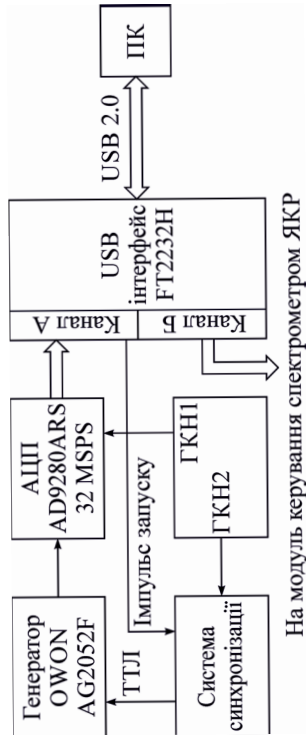


Рис. 4. Блок-схема лабораторної установки для експериментальних випробувань розробленої СЗД імпульсного спектрометра ЯКР:

ГКН1, ГКН2 – виходи генераторів, керованих напругою (15 та 50 МГц відповідно); TTL – вхід синхронізації цифрового генератора сигналів OWON AG2052F

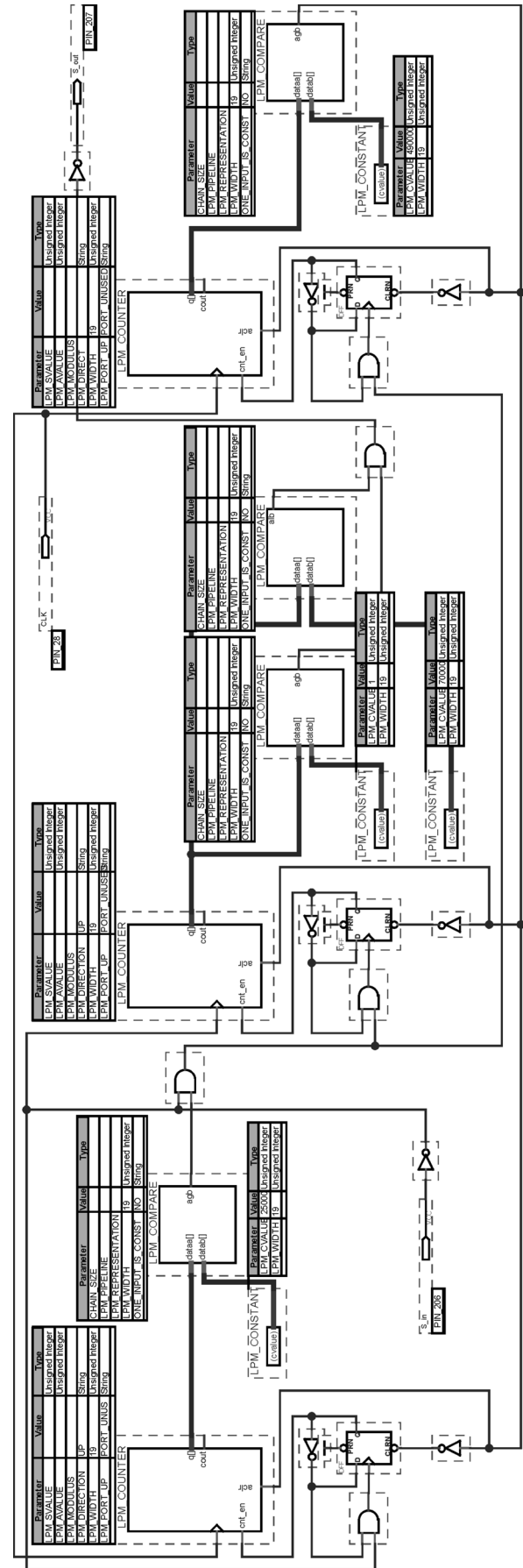


Рис. 5. Схема формування синхроімпульсу запуску

знизити вартість лабораторного обладнання при забезпеченні високого рівня умов проведення радіофізичних експериментів у галузях імпульсної Фур'є та релаксаційної спектроскопії ЯКР.

Висновки

Результатом вирішення задачі збору даних сигналів ядерної спінової індукції стало розроблення компактної системи збору даних для імпульсного спектрометра ЯКР шляхом апаратної реалізації швидкісного USB-інтерфейсу та синтезу віртуального інструмента LabVIEW. Експериментальні дослідження показали:

— апаратна частина USB-інтерфейсу розробленої системи збору даних забезпечує одночасну роботу двох незалежних каналів із загальною швидкістю передавання даних до 480 Мб/с;

— формування синхроімпульсу запуску уможливорює використання системи у режимі багатократного експерименту з метою цифрового накопичення і усереднення даних;

— показником високої інформативності розробленої системи є візуалізація складних мультиплетних спектрів ЯКР з шириною смуги до 7,5 МГц та роздільною здатністю за частотою близько 200 Гц.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Khandozhko V., Raranskii N., Balazjuk V. et al. Temperature and baric dependence of nuclear quadruple resonance spectra in indium and gallium monoselenides // Proceedings of SPIE 9066, 11th International Conference on Correlation Optics. — Ukraine, Chernivtsi. — 2013. — P. 90661G-1—7. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2053544>
2. Саміла А. П., Ластівка Г. І., Хандожко В. О. Вимірювання індукції магнітного поля із застосуванням ефекту Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі сполук GaSe та InSe // Журнал нано- та електронної фізики. — 2016. — Т. 8, № 4. — С. 04081-1—4.
3. Саміла А. П., Ластівка Г. І., Хандожко В. А., Ковалюк З. Д. Оперативний контроль напівпровідникових кристалів InSe і GaSe методом ядерного квадрупольного резонанса // Фізика і техніка напівпровідників. — 2016. — Т. 50, № 8. — С. 1055—1058. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782616080200>
4. Apih T., Rameev B., Mozhukhin G., Barras J. (Eds.) Magnetic resonance detection of explosives and illicit materials: NATO science for peace and security. Series B: Physics and Biophysics. — Springer, 2014.

5. Браиловский В.В., Саміла А.П., Хандожко А.Г. Датчик сигналов ядерного квадрупольного резонанса // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 2. — С. 177.

6. Хандожко А. Г., Хандожко В. А., Саміла А. П. Импульсный радиоспектрометр ЯКР с эффективным подавлением переходного процесса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т. 6, № 12. — С. 21—25.

7. Саміла А. П. Застосування статично-конфігурованої ПЛІС у цифровій системі керування радіоспектрометром ЯКР // Телекомунікаційні та інформаційні технології. — 2016. — № 4. — С. 73—82.

8. Weinan Tang, Weimin Wang. A single-board NMR spectrometer based on a software defined radio architecture // Measurement Science and Technology. — 2011. — Vol. 22, N 1. — P. 015902-1—8.

9. Beguš Samo, Jazbinšek Vojko, Pirnat Janez, Trontelj Zvonko. A miniaturized NQR spectrometer for a multi-channel NQR-based detection device // Journal of Magnetic Resonance. — 2014. — Vol. 247. — P. 22—30. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2014.08.002>

10. Kazuyuki Takeda. OPENCORE NMR: Open-source core modules for implementing an integrated FPGA-based NMR spectrometer // Journal of Magnetic Resonance. — 2008. — Vol. 192, iss. 2. — P. 218—229. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2008.02.019>

11. FT2232H Dual High Speed USB to Multipurpose UART/FIFO IC. Datasheet. Version 2.5 / FTDI Chip, Document No.: FT_000061 Clearance No.: FTDI#77. [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT2232H.pdf

12. Ластівка Г. І., Хандожко О. Г., Хандожко В. О. Дослідження мультиплетності спектрів ядерного квадрупольного резонансу ізотопів ¹¹³In, ¹¹⁵In в кристалах InSe виходячи з розплаву // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — Т. 6, № 12. — С. 54—57.

13. Samila A., Lastivka G., Politansky L. A Computational model of signal transformations in pulsed NQR spectrometer // The International Conference TCSET' 2016 "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". — Ukraine, Lviv-Slavske. — 2016. — P. 37—39.

14. Саміла А. П., Каземірський Т. А. Програмно-технічний комплекс проектування систем з великим ступенем інтеграції на програмованому кристалі // Acta Universitatis Pontica Euxinus. Спеціальний випуск. — 2016. — С. 573—578.

15. RadioProcessor Model G: Complete RF acquisition and excitation system with digital detection, real-time signal processing, and three gradient voltage outputs [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.spincore.com/products/RadioProcessor-G/RadioProcessor-G.shtml>

*Дата надходження рукопису
до редакції 15.02 2017 р.*

А. П. САМИЛА

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
E-mail: andriysamila@gmail.com

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО СПЕКТРОМЕТРА ЯКР

Предложена аппаратно-программная реализация компактной системы сбора данных для импульсного спектрометра ядерного квадрупольного резонанса, аппаратные решения которой базируются на мультимедийных технологиях.

типротокольном USB245 FIFO преобразователе FT2232H, что обеспечивает передачу данных со скоростью до 480 Мб/с. С использованием средств графического объектно ориентированного программирования синтезирован виртуальный инструмент LabVIEW для визуализации и обработки данных сигналов ядерной спиновой индукции.

Ключевые слова: виртуальный инструмент, система сбора данных, ЯКР, LabVIEW, USB.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.16
UDC 004.67; 539.143.44

A. P. SAMILA
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National Universit
E-mail: andriysamila@gmail.com

HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DATA ACQUISITION SYSTEM FOR PULSED NQR SPECTROMETER

A hardware and software implementation of compact data acquisition system for pulsed nuclear quadrupole resonance spectrometer is proposed. The developed system is based on multi-protocol converter USB-245FIFO FT2232H, which provides data transfer speeds up to 480 Mb/s. For nuclear spin induction visualization and data signal processing using graphical tools of the object oriented programming a LabVIEW virtual instrument is synthesized. To synchronize data acquisition system with start of the exciting pulse the FPGA configuration structure is developed.

The experimental results are showed possibility of the broadband nuclear quadrupole resonance spectrums imaging with frequency resolution 1.6 kHz, which confirms the high accuracy of the developed data acquisition system. Two-channel transmitter provides simultaneous operation of the two independent data channels in a single hardware USB interface.

The use of the proposed data acquisition system for portable nuclear quadrupole resonance spectrometers will significantly reduce the cost of laboratory equipment for radio physical experimentation.

Keywords: virtual instrument, data acquisition system, NQR, LabVIEW, USB interface

REFERENCES

1. Khandozhko V., Raranskii N., Balazjuk V., Kovalyuk Z., Samila A. Temperature and baric dependence of nuclear quadrupole resonance spectra in indium and gallium monoselenides. *Proceedings of SPIE 9066, 11th International Conference on Correlation Optics*, Ukraine, Chernivtsi, 2013, pp. 90661G-1–7. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2053544>
2. Samila A. P., Lastivka G. I., Khandozhko V. O. Measuring the magnetic field using the zeeman effect in nuclear quadrupole resonance of GaSe and InSe compounds. *Journal of Nano and Electronic Physics*, 2016, vol. 8, iss. 4, pp. 04081-1–4. [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04081](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04081)
3. Samila A.P., Lastivka G.I., Khandozhko V.A., Kovalyuk Z.D. Prompt quality monitoring of InSe and GaSe semiconductor crystals by the nuclear quadrupole resonance technique. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, iss. 8, pp. 1034–1037. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782616080200>
4. Apih T., Rameev B., Mozzhukhin G., Barras J. (Eds). *Magnetic resonance detection of explosives and illicit materials: NATO science for peace and security. Series B: Physics and Biophysics*. Springer, 2014, 168 p.
5. Brailovskii V. V., Samila A.P., Khandozhko V.A. [Sensor of the nuclear quadrupole resonance signals]. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2010, no. 2, p. 177. (Rus)
6. Khandozhko A., Khandozhko V., Samila A. [A pulse coherent nqr spectrometer with effective transient suppression]. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*, 2103, vol. 6, no. 12, pp. 21-25. (Rus)
7. Samila A. P. [The use of a statically-configurable PLD in the NQR spectrometer control digital system]. *Telecommunications and Information Technologies*, 2016, no. 4, pp. 73-82. (Ukr)
8. Weinan Tang, Weimin Wang. A single-board NMR spectrometer based on a software defined radio architecture. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 015902-1–8.
9. Beguš Samo, Jazbinšek Vojko, Pirnat Janez, Trontelj Zvonko. A miniaturized NQR spectrometer for a multi-channel NQR-based detection device. *Journal of Magnetic Resonance*, 2014, vol. 247, pp. 22-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2014.08.002>
10. Kazuyuki Takeda. OPENCORE NMR: Open-source core modules for implementing an integrated FPGA-based NMR spectrometer // *Journal of Magnetic Resonance*, 2008, vol. 192, iss. 2, pp. 218-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2008.02.019>
11. FT2232H Dual High Speed USB to Multipurpose UART/FIFO IC. Datasheet. Version 2.5 / FTDI Chip, Document No.: FT_000061 Clearance No.: FTDI#77 (Electronic resource). Access mode: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT2232H.pdf
12. Lastivka G., Khandozhko A., Khandozhko V. [Investigation of the multiplicities of nuclear quadrupole resonance spectrums isotopes 113,115In crystals InSe grown from the melt]. *Eastern-European Journal of Eenterprise Technologies*, 2013, vol. 6, no. 12, pp. 54-57 (Ukr)]
13. Samila A., Lastivka G., Politsansky L. A Computational model of signal transformations in pulsed NQR spectrometer. *The International Conference TCSET' 2016 "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science"*, Ukraine, Lviv-Slavske, 2016, pp. 37-39.
14. Samila A. P., Kazemirskii T. A. [Software and hardware complex for design systems with a high degree of integration in the programmable chip]. *Acta Universitatis Pontica Euxinus*, Special issue, 2016, p. 573-578. (Ukr)
15. RadioProcessor Model G: Complete RF Acquisition and Excitation System with Digital Detection, Real-Time Signal Processing, and Three Gradient Voltage Outputs (Electronic resource). Access mode: <http://www.spincore.com/products/RadioProcessor-G/RadioProcessor-G.shtml>

К. м. н. В. Е. БАБЕЛЮК¹, д. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ^{2,3},
к. м. н. И. Л. ПОПОВИЧ⁴, И. Г. КОРСУНСКИЙ²

Украина, г. Трускавец, ¹Санаторий «Молдова»; г. Черновцы, ²СКБ «ПДК», ³ЧНУ имени Юрия Федьковича; г. Киев, ⁴Институт физиологии НАН Украины им. О. О. Богомольца
E-mail: yuriydr@gmail.com

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРАПИИ И СТИМУЛЯЦИИ НЕРВНЫХ ЦЕНТРОВ ЧЕЛОВЕКА

Разработан генератор, названный VEB-1, для электротерапии и стимуляции нервных центров человека токовыми импульсами с точностью поддержания частоты стимуляции не более 0,001 Гц. Принцип действия генератора основан на методе частотного биения. Несущая частота рабочих токовых импульсов соответствует 32-й гармонике частоты биения рабочих импульсов. Проведены клинические испытания, показавшие эффективность генератора по двадцати характеристическим показателям состояния здоровья.

Ключевые слова: генератор, электростимуляция, нервный центр, импульс тока, частотное биение.

Развитие медицинской науки и свежие идеи в клинической медицине ставят новые задачи по созданию аппаратуры для практического здравоохранения. Современный технологический фундамент научной и клинической медицины возник и развивается на стыке наук, основывается на потенциале различных областей науки и техники и объединяется общими проблемами медицинской направленности.

Инвестиции, вкладываемые в развитие современной электронной техники биомедицинского назначения, составляют миллиарды долларов и продолжают увеличиваться. В ноябре 2016 года аналитическая компания Kalorama Information [1] обнародовала краткие результаты исследования мирового рынка в отношении только медицинской носимой электроники. Его объем в 2016 году превысил \$13 млрд. и продолжает расти.

Одним из востребованных в настоящее время направлений является разработка биомедицинской аппаратуры для электростимуляции нервной системы. Основной задачей электростимуляции является усиление, возбуждение или восстановление ослабленной или болезненно измененной деятельности определенных органов и систем [2–4]. Электростимуляция нервной системы проводится путем воздействия на организм незначительных импульсов электрического тока, имитирующих ее нормальные электрические сигналы.

Современные аппараты для электростимуляции могут генерировать импульсы прямоугольной, треугольной, трапециевидной формы различной длительности и частоты. Однако для эффективной стимуляции ослабленного органа не-

обходимо также обеспечить максимальное совпадение частоты, генерируемой электронным стимулятором, с собственной рабочей частотой колебания органа. Среди представленных на рынке электростимуляторов мышц, нервов и отдельных органов имеется достаточно много приборов, которые способны поддерживать точность установки частоты на уровне 0,1–0,01 Гц [5–11]. При этом, однако, у разных людей рабочие частоты одних и тех же органов могут отличаться. Согласно нашим исследованиям эти отличия укладываются в определенный частотный диапазон, отклонения между двумя людьми может составлять от 0,1 до 0,001 Гц [11, 12].

В настоящей работе был создан генератор электрических сигналов для стимуляции органов человека с точностью поддержания частоты не ниже 0,001 Гц.

Методика решения задачи

В качестве объекта воздействия электрическими сигналами были выбраны нервные центры (узлы) организма человека.

Нервные центры имеют ряд характерных функциональных свойств, из которых наибольший интерес в рамках нашей задачи представляет трансформация ритма возбуждений, т. е. изменение частоты нервных импульсов при прохождении через нервный центр. В силу особенностей центральной нервной системы частота возбуждений, поступающих из нервных центров к рабочему органу, колеблется от 50 до 200 в секунду.

В результате экспериментальных исследований воздействия импульсов прямоугольной формы частотой 7–18 Гц были зафиксированы ди-

диапазоны частот для каждого основного нервного узла. Нижняя частота каждого из диапазонов оказывала минимальное стимулирующее воздействие на соответствующий нервный узел, верхняя — максимальное.

Для эффективного возбуждения нервных центров, а именно — повышения собственной рабочей частоты, необходимо выбрать метод их стимуляции. Оптимальным здесь, на наш взгляд, является волновое воздействие на нервные центры, реализуемое методом частотных биений. Этот метод заключается в получении колебаний с близкими частотами f_{01} и f_{02} [13; 14, с. 173—190], благодаря чему эффект воздействия на объект усиливается. При упрощенном рассмотрении амплитуды обоих колебаний A_{m1} и A_{m2} будем считать равными между собой ($A_{m1} = A_{m2} = A_m$), как и их частоты. В результате сложения колебаний с близкими частотами возникают результирующие биения, которые представляют собой колебания с усредненной частотой $(f_1 + f_2)/2$. Амплитуда биений периодически изменяется от максимального значения $2A_m$ до минимального значения 0. При каждом обращении амплитуды в ноль фаза скачком меняется на π . Частота биений определяется как разность частот составляющих колебаний.

В нашем случае для получения эффекта — частотного биения — в двух сигнальных каналах формируются импульсы прямоугольной формы с разницей по частоте, являющей частотой биения.

Причиной появления биений является сдвиг фаз сигналов с формированием следующего импульса, причем сдвиг фазы кратен разности частот в каналах:

$$P = 360^\circ / (f_1 - f_2), \quad (1)$$

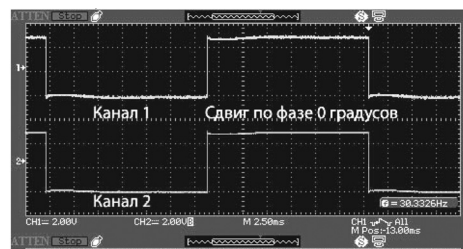
где P — сдвиг фазы (в градусах);

f_1, f_2 — частота первого и второго каналов соответственно.

К примеру, для получения биения с частотой 6 Гц необходимо в первом канале сформировать импульсы с несущей частотой 30 Гц, во втором — 36 Гц.

При формировании первого импульса в обоих каналах со сдвигом фаз 0° получим на выходе абсолютный ноль по току (рис. 1, а). При формировании второго импульса разность частот 6 Гц приводит к сдвигу по фазе 60° ($360^\circ/6$), а скважность импульса на выходе составляет $100\%/6 = 16,67\%$. Отметим, что в данном случае с каждым последующим тактом происходит увеличение сдвига по фазе на 60° (рис. 1, б—е). При формировании третьего импульса скважность составляет 33,33%; при формировании четвертого — 50%; пятого — 33,33%; шестого — 16,67%.

а)



б)



в)



г)



д)



е)

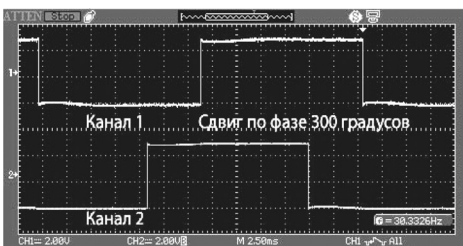


Рис. 1. Формирование импульсов, начиная со первого (а) и до шестого (е)

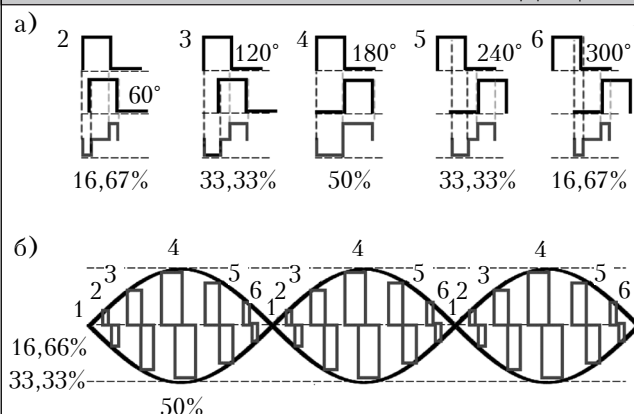


Рис. 2. Полученный с помощью частотного биения периодический сигнал (а) и график тока сформированного выходного сигнала (б)

На рис. 2 приведен периодический сигнал, сформированный с помощью частотного биения напряжения в двух каналах для формирования общего выходного сигнала, и график тока выходного сигнала, сформированного в соответствии с полученными импульсами разной скважности.

Чем больше скважность импульса между первым и вторым выходными каналами, тем большим получается ток воздействия. В итоге, как видно на рис. 2, б, за один период частоты биения ток воздействия возрастает до максимума к середине периода и затем уменьшается до нуля к завершению периода. Такой эффект и создает ударные волны по объекту с требуемой частотой и закручивает в спираль электромагнитное поле в объекте, поскольку с точки зрения электротехники человеческое тело является индуктивным контуром.

Конструкция генератора

Для обеспечения эффекта частотного биения генератор собран на основе двухканальной схемы с использованием двух синтезаторов частоты и соответствующих им усилителей, каждый из которых генерирует свою частоту. На рис. 3 представлена его блок-схема с демонстрацией движения электрического тока от блока питания (аккумулятора) 9 до микроконтроллера 3, а также движения и преобразования тока от дискретизации и разделения на два канала до попадания к пациенту.

В генераторе применен дисплей 1 типа RC1604A-YKY-CSX. Синтезатор сигнала тактовой частоты 2 представлен микросхемой типа AD9833BRW, которая формирует тактирующий сигнал для синтезаторов 5, 6 каналов А и В. В этих каналах формируются импульсы тока, промодулированные по частоте. Выходной сигнал каналов синтезируется микросхемой типа MC34063, а усилители сигнала 7, 8 каналов собраны на основе транзисторов типа KT3130A-9 (входной каскад) и транзисторов типа 2N5817 (выходной каскад).

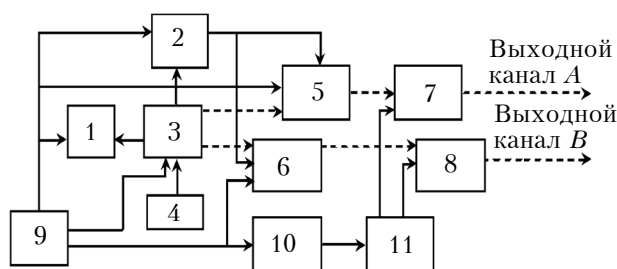


Рис. 3. Блок-схема генератора для электротерапии и стимуляции нервных центров:

1 — дисплей; 2 — синтезатор сигнала тактовой частотой дискретизации до 0,001 Гц; 3 — микроконтроллер; 4 — энкодер; 5, 6 — синтезаторы сигналов в каналах А и В соответственно; 7, 8 — усилители сигналов в каналах А и В соответственно; 9 — аккумулятор (5 В); 10 — преобразователь напряжения (5–24 В); 11 — регулятор напряжения; 12 — регулятор амплитуды выходного сигнала

В качестве микроконтроллера 3 использован прибор фирмы Atmel ATMEGA16, который имеет встроенный контроллер ISP-шины. Микроконтроллер содержит специализированное программное обеспечение для управления работой устройства. Энкодер 4 типа 3315C-101-016L осуществляет запуск работы контроллера при включении прибора, выбор программы с определенным набором частот и установления рабочего значения тока.

Преобразование напряжения с 5 до 24 В осуществляется с помощью микросхемы KS34063 (10). Регулятор напряжения выходного сигнала (регулятор амплитуды) выполнен на основе транзисторов типа BC817 (NPN) и на основе транзисторов типа BC807 (PNP). Общее питание генератора для электротерапии и стимуляции является автономным и осуществляется от аккумулятора 5 В (9), например, типа Gmini mPower Pro Series MPB521.

Передача электрического сигнала к пациенту осуществляется с помощью контактных медных электродов через кабели.

Работа генератора осуществляется следующим образом.

При включении устройства на него подается питание от аккумулятора 9, микроконтроллер 3 инициирует синтезатор сигнала тактовой частоты 2 и формирует запрос на ввод режима работы, который выбирается с помощью энкодера 4 из списка лечебных программ, содержащихся в памяти микроконтроллера. Значение частоты сигнала, продолжительность его действия и величина тока, соответствующие выбранной программе, отображаются на дисплее 1.

После выбора лечебной программы инициализируется синтезатор 2 сигнала тактовой частоты, который формирует тактирующий сигнал для синтезаторов 5, 6 каналов А и В. Электрический сигнал в канале В генерируется с запаздывани-

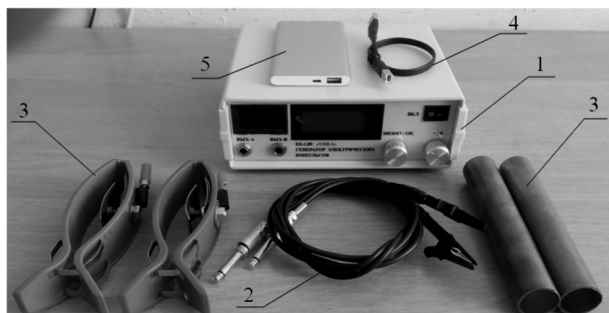


Рис. 4. Внешний вид генератора с комплектом необходимого оборудования:

1 — генератор VEB-1; 2 — шнуры с разъемами JAKC и контактными зажимами для подключения к выходам OUT-A и OUT-B; 3 — контактные площадки (или трубки); 4 — кабель питания с разъемами USB-B и USB-A; 5 — аккумуляторная батарея

Технические характеристики генератора

Уровень выходного сигнала по амплитуде	3,6–16,2 В
Максимальная амплитуда выходного сигнала	16,2 В
Максимально возможный ток воздействия	25 мА
Наличие защиты от повышенного тока (25 мА)	Да
Ток воздействия	8–18 мА
Форма выходного сигнала	Меандр
Диапазон частот воздействия	144–1120 Гц
Напряжение питания	4,8–5,3 В
Время непрерывной работы	не менее 8 ч

ем относительно канала А, что создает эффект частотного биения.

Программное обеспечение прибора задает частоту биения рабочего импульса в диапазоне от 0,01 до 100 Гц с шагом дискретизации в каждом канале не более 0,001 Гц, что обеспечивается синтезатором тактовой частоты 2.

Для эффективного возбуждения нервных центров необходимо обеспечить частотный резонанс между их собственными частотами и частотой рабочих токовых импульсов частотного биения. Экспериментально установлено, что несущая частота рабочих токовых импульсов должна соответствовать 32-й гармонике частоты частотного биения.

Внешний вид генератора приведен на рис. 4, а его технические характеристики — в таблице.

Заключение

Клинические исследования разработанного генератора для электротерапии и стимуляции, который получил название VEB-1, проводились на базе лабораторного комплекса санатория «Молдова» (г. Трускавец). Они показали эффективность прибора по двадцати ха-

рактеристическим показателям состояния здоровья. Выявлено, например, что при стимуляции сакраментального нервного сплетения в результате прохождения курса, состоящего из четырех процедур, у 13 практически здоровых мужчин-добровольцев суммарный прирост тестостерона составил $29 \pm 6\%$; количество микробов, поглощаемых одним фагоцитом, увеличилось на 21% при погрешности 8%.

Генератор VEB-1 соответствует Техническому регламенту безопасности согласно ДСТУ ІЕС 60204-1:2004.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Top 10 Medical Device Trends to Watch in 2017. — Dec. 27, 2016. — 4 p.
2. Powell J., D Pandyan., Granat M., Cameron M., Stott D. Electrical Stimulation of Wrist Extensors in Poststroke Hemiplegia // Stroke: Journal of the American Heart Association. — 1999. — № 30 (7). — P. 1384–1389.
3. Kern H., Carraro U., Adami N., Biral D., Hofer C., Forstner C., Mudlin M., Vogelaier M., Pond A., Boncompagni S., Paolini C., Mayr W., Protasi F., Zampieri S. Home-based functional electrical stimulation rescues permanently denervated muscles in paraplegic patients with complete lower motor neuron lesion // Neurorehabil Neural Repair. — 2010. — №. 24 (8). — P. 709–721.
4. Chantraine A., Baribeault A., Uebelhart D., Gremion G. Shoulder Pain and Dysfunction in Hemiplegia: Effects of Functional Electrical Stimulation // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. — 1999. № 80. — P. 328–331.
5. Пат. 2164424 РФ. Способ низкочастотной электромагнитной терапии и устройство для его осуществления / Коноплев С.П., Коноплева Т.П. — 27.03.2001. — Бюл. № 11.
6. Пат. ФРГ 4238745. Устройство для генерации магнитного поля с дублированной системой и устройством защиты от помех / Walter Kaufmann. — 19.05.1994.
7. Васильева Л. В., Горьковенко И. А. Низкочастотная электромагнитная терапия альтернатива антибиотикотерапии язвенных поражений желудочно-кишечного тракта // Вестник новых медицинских технологий. — 2103. — Вып 2, Т. XX. — С. 185–187.
8. Прибор импульсной электромагнитной терапии // Вестник спортивных инноваций. — 2012. — № 38. — С. 6.
9. Пат. на полезную модель № 101365 РФ. Устройство для электромагнитной терапии / Шарифов С. К., Соловьев С.В. — 2011. — Бюл. № 2.
10. Пат. Украины на полезную модель № 49957 Портативный прибор для электротерапии и стимуляции / Турчинов А.Н. Волковинская А.А. — 2010. — Бюл. № 9.
11. Бабелюк Н.В., Бабелюк В.Є., Дубкова Г.І. та ін. Модуляція функціональних систем практично здорових чоловіків курсом електростимуляції // IX Міжнародний симпозіум «Актуальні проблеми біофізическої медицини». — 2016. — Україна, м. Київ. — С. 10–11.
12. Бабелюк Н.В., Бабелюк В.Є., Дубкова Г.І. та ін. Електростимуляція приладом «ES–01.9 WEB» активує деякі функціональні системи організму практично здорових чоловіків // Тези доповідей XIV міжнар. наук.-практ. конференції «Валеологія: сучасний стан, напрямки та перспективи розвитку». — 2016. — Україна, м. Харків. — С. 198–200.
13. Бишоп Р. Колебания. — Москва: Наука, 1986.
14. Винницкий А.С. Автономные радиосистемы. — Москва: Радио и связь, 1986.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.02 2017 г.

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕРАПІЇ ТА СТИМУЛЯЦІЇ НЕРВОВИХ ЦЕНТРІВ ЛЮДИНИ

Розроблено генератор для електротерапії і стимуляції нервових центрів людини VEB-1, робота якого заснована на стимуляції нервової системи пацієнта струмовими імпульсами з використанням методу частотного биття з точністю підтримки частоти стимуляції не більше 0,001 Гц. Несуча частота робочих струмових імпульсів відповідає 32 гармоніці частоти биття робочих імпульсів. Проведено клінічні випробування, які показали ефективність генератора VEB-1 по двадцяти характеристичним показникам стану здоров'я.

Ключові слова: генератор, електростимуляція, нервовий центр, імпульс струму, частотне биття.

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.1-2.23

UDC 537.39; 621.382; 004.021; 612.8.04

V. E. BABELYUK¹, Yu. G. DOBROVOLSKIY^{2,3},
I. L. POPOVICH⁴, I. G. KORSUNSKIY²

Ukraine, Truskavets, ¹«Moldova» Resort; Chernivtsy, ²SKB «PDK»

³Yuriy Fedkovich Chernivtsy National University,

⁴Kyiv, Bogomoletz Institute of Physiology of NAS of Ukraine

E-mail: yuriydr@gmail.com

GENERATOR FOR ELECTROTHERAPY AND STIMULATION OF HUMAN NERVE CENTERS

A generator for electrotherapy and stimulation of human VEB-1 nerve centers has been developed. The device's robots are based on stimulation of the patient by current pulses. Frequency beat method is used. The accuracy of maintaining the stimulation frequency is not more than 0.001 Hz. The carrier frequency of the working current pulses corresponds to the 32th harmonic of the frequency of the frequency pulse of the operating pulses. The clinical tests of the VEB-1 generator were carried out, showing the ego efficiency in twenty characteristic health indicators.

Keywords: Generator, electrostimulation, nerve center, current pulse, frequency beats.

REFERENCES

1. Top 10 Medical Device Trends to Watch in 2017, Dec 27, 2016, 4 p.

2. Powell J., D Pandyan., Granat M., Cameron M., Stott D. Electrical Stimulation of Wrist Extensors in Poststroke Hemiplegia. *Stroke: Journal of the American Heart Association*, 1999, no 30 (7), pp. 1384–1389.

3. Kern H., Carraro U., Adami N., Biral D., Hofer C., Forstner C., Mudlin M., Vogelauer M., Pond A., Boncompagni S., Paolini C., Mayr W., Protasi F., Zampieri S. Home-based functional electrical stimulation rescues permanently denervated muscles in paraplegic patients with complete lower motor neuron lesion. *Neurorehabil Neural Repair*, 2010, no. 24 (8), pp. 709–721.

4. Chantraine A., Baribeault A., Uebelhart D., Gremion G. Shoulder Pain and Dysfunction in Hemiplegia: Effects of Functional Electrical Stimulation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1999, no 80, pp. 328–331.

5. Konoplev S.P., Konopleva T.P. [Method of low-frequency electromagnetic therapy and a device for its implementation]. Patent RF, no 2164424, 2001 (Rus)

6. Kaufmann W. [Device for generating a magnetic field with a duplicated system and an interference protection device]. Patent FRG, no 4238745, 1994. (Rus)

7. Vasilieva L.V., Gorkovenko I. A. [Low-frequency electromagnetic therapy alternative to antibiotic therapy of ulcerative

lesions of the gastrointestinal tract]. *Vestnyk novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2010 Iss. 2. vol. XX, pp. 185–187. (Rus)

8. [The device of pulse electromagnetic therapy]. *Vestnyk sportivnykh innovatsii*, 2012, no 38, p. 6. (Rus)

9. Sharifov S.K., Soloviev S.V. [Device for electromagnetic therapy]. Patent RF, no. 101365, 2011. (Rus)

10. Turchinov A.N., Volkovynskaia A.A. [Portable device for electrotherapy and stimulation], Patent UA, no. 49957, 2010. (Rus)

11. Babelyuk N. V., Babelyuk V. E., Dubkova G. I., Kikhtan V. V., Musienko V. Yu., Gubitsky V. Y., Dobrovolsky Yu. G., Korsunsky I. G., Kovbasnyuk M. M., Korolishin T. A., Popovich I. L. [The modularity of functional systems is practically healthy for people with a course of electrostimulation]. *Proceed. of the IX Mizhnarodnii simpozium «Aktualnye problemy biofizicheskoi meditsyny»*, Ukraine, Kyiv, 2016. pp. 10–11. (Ukr)

12. Babelyuk N. V., Babelyuk V. E., Dubkova G. I., Korolishyn T. A., Kikhtan V. V., Dobrovolsky Yu. G., Korsun I. G., Kovbasnyuk M. M. [Electrical stimulation device «ES-01.9 WEB» activates some functional systems of the body healthy men]. *Proceed. of the XIV International Scientific Conference «Valeologiya: current status, trends and prospects of development»*, Ukraine, Kharkiv, 2016, pp.198–190. (Ukr)

13. Byshop R. [Fluctuations]. Moscow, Nauka, 1986, 190 p. (Rus)

14. Vinnitsky A. S. [Autonomous radio systems]. Moscow, Radio and communication, 1986, pp.173–190. (Rus)

К. т. н. В. Р. СТЕМПИЦКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ AlGaN/GaN

Представлены результаты исследований характеристик датчика Холла предложенной конструкции на основе гетероструктуры AlGaN/GaN с различными геометрическими параметрами активной области, функционирующего в диапазоне температуры от -25 до 400°C . Исследования выполнены с использованием программных средств приборно-технологического моделирования. Активным слоем датчика является область двумерного электронного газа, которая формируется между барьерным слоем $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ и нелегированным канальным слоем GaN. Полученные результаты (магнитная чувствительность по току $66,4 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ при комнатной температуре, температурный коэффициент магнитной чувствительности $0,0273 \text{ \%}/^\circ\text{C}$) свидетельствуют о перспективности предлагаемого решения для практического использования.

Ключевые слова: высокотемпературный датчик Холла, гетероструктуры AlGaN/GaN, компьютерное моделирование.

В последние годы практика применения микроэлектронных сенсоров в различных устройствах свидетельствует о необходимости расширения диапазона рабочей температуры в сторону ее увеличения. Так, автоэлектроника, авионика, нефте- и газодобыча в глубоких скважинах нуждаются в аппаратуре (в том числе магнитометрической), функционирующей при температуре до $300-350^\circ\text{C}$. При этом предельная рабочая температура датчиков, изготовленных на основе объемного кремния, составляет лишь $150-170^\circ\text{C}$, поскольку при более высоких значениях концентрация термически генерированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией основных носителей, что существенно ухудшает характеристики прибора. Одним из путей повышения рабочей температуры до 350°C [1] для кремниевых датчиков Холла (ДХ) является их формирование по технологии «кремний на изоляторе».

В полупроводниках InAs, InSb, GaAs и гетероструктурах на их основе носители заряда обладают очень высокой подвижностью. Датчики Холла на основе этих материалов имеют достаточно высокую магнитную чувствительность в диапазоне температуры T от гелиевой до комнатной. При более высокой температуре из-за узкой запрещенной зоны материала термическая активация собственных носителей может изменить кинетические свойства этих датчиков, а при $T > 200^\circ\text{C}$ они становятся непригодными для использования. Увеличить рабочую температуру можно повышением степени легирования актив-

ного слоя, однако это приводит к снижению подвижности носителей и, как следствие, уменьшению чувствительности приборов на основе указанных полупроводников. В настоящее время максимальная температура эксплуатации большинства представленных на рынке датчиков Холла ниже 200°C [2].

Тонкие сильнолегированные пленки InSb на подложке GaAs являются отличным материалом для изготовления ДХ, работающих при температурах от гелиевой до комнатной. В [3, 4] описаны датчики Холла, изготовленные из таких пленок, которые функционируют как при низких температурах (от гелиевых до -23°C), так и при высоких (от комнатной до 300°C).

В [5, 6] показаны возможности формирования высокотемпературных сенсорных устройств с активной областью на широкозонных полупроводниках, таких как SiC, GaN, AlN, InN, и гетероструктурах на их основе (AlGaN/GaN, AlGaIn/GaN, InGaIn/GaN, InGaIn/InN). Данная группа материалов обладает высокой термической стабильностью электрических параметров при повышенных температурах. К недостаткам следует отнести сравнительно невысокую подвижность носителей заряда, из-за чего магнитная чувствительность датчиков на их основе ниже, чем на основе узкозонных полупроводников.

В [7] показано, что карбид кремния SiC можно также использовать в качестве материала для высокотемпературных ДХ. Однако необходимость точного контроля концентрации легирующих примесей и большая толщина (до не-

скольких микрометров) проводящих слоев карбида кремния существенно ограничивает его чувствительность и стабильность при высоких температурах.

К материалам с широким спектром практических применений в последнее время относят нитриды металлов третьей группы, в частности нитрид галлия. В конструкции ДХ на основе данного материала активной (чувствительной) областью является двумерный электронный газ, который формируется между барьерным слоем AlGaIn и нелегированным каналным слоем GaN. Подвижность носителей заряда в нем достигает $2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре [8]. Таким образом, в канальном слое GaN непосредственно под гетеропереходом формируется чрезвычайно тонкий слой с плотностью электронов $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью до $1260 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Стабильность параметров двумерного электронного газа определяет основное преимущество GaN для создания высокотемпературных ДХ. При температуре выше комнатной температурный коэффициент напряжения Холла для гетероперехода AlGaIn/GaN составляет $0,07\%/^{\circ}\text{C}$ [9], что является лучшим результатом среди известных полупроводниковых материалов.

Целью описанных в работе исследований являлась разработка и оптимизация эксплуатационных характеристик датчика Холла на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN, предназначенного для использования в системах обработки информации и функционирующего в диапазоне температуры от -25 до 400°C .

Конструкция и характеристики датчика Холла

Конструкция ДХ на основе AlGaIn/GaN-гетероперехода представлена на **рис. 1**. Структура AlGaIn/GaN включает в себя: толстый ($2,0 \text{ мкм}$) нелегированный слой GaN, который играет роль подложки; тонкий (25 нм) барьерный слой $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$; сформированный в активной области холловский крест из полосок длиной $L = 50 \text{ мкм}$ и шириной $W = 25 \text{ мкм}$. Регистрируемый сигнал снимается с холловских электродов.

Зависимость напряжения Холла V_X от толщины активной области d , геометрического коэффициента G , постоянной Холла R_X , индукции магнитного поля B , а также силы тока I , который протекает между токовыми контактами, можно представить в виде

$$V_X = GR_X IB/d.$$

Абсолютная магнитная чувствительность S датчика Холла выражается как отношение вы-

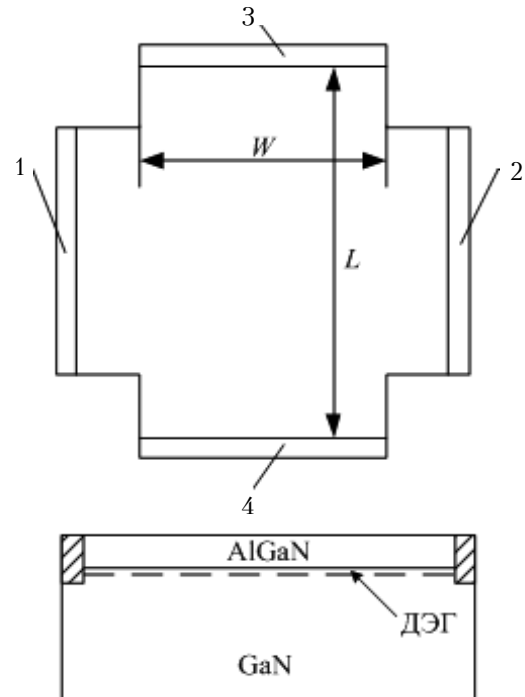


Рис. 1. Конструкция ДХ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN с омическими контактами к токовым (1, 2) и к холловским (3, 4) электродам

ходного напряжения Холла V_X к нормальной составляющей магнитной индукции B :

$$S = \left| \frac{V_X}{B} \right|; \quad (1)$$

а магнитная чувствительность по току и по напряжению определяется, соответственно, как

$$S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{1}{I} \frac{V_X}{B} \right| = G \frac{r_X}{qN_s} \approx \frac{1}{qN_s}; \quad (2)$$

$$S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{1}{V} \frac{V_X}{B} \right| = G \frac{W}{L} \mu_X \approx \mu_X, \quad (3)$$

где r_X , μ_X — фактор Холла и подвижность Холла основных носителей;

q — заряд носителя;

N_s — поверхностная концентрация (плотность) носителей заряда в активном слое;

V — приложенное напряжение.

Выражения (1) — (3) показывают, что низкая плотность носителей заряда и высокая подвижность Холла являются критическими факторами, которые необходимо учитывать при разработке датчика Холла с высокими эксплуатационными характеристиками. Для исследуемого в работе случая еще одним значимым параметром является температура. Температурный коэффициент магнитной чувствительности датчика Холла определяется формулой

$$TC_M = (1/M) (dM / dT),$$

где M — параметр ДХ, связанный с его чувствительностью (ток или напряжение).

Результаты моделирования

Моделирование электрических и магнитных характеристик ДХ на основе GaN выполнялось с использованием соответствующих модулей программного комплекса компании Silvaco [12]. Исследования проводились для структур, длина L которых составляла 50 мкм, а ширина W варьировалась от 10 до 40 мкм.

Как видно из представленных на рис. 2, а результатов моделирования, чувствительность по току S_I изменяется от минимального значения, равного 36,5 В/(А·Тл) при $L/W = 1,25$, до значения насыщения 70 В/(А·Тл) при $L/W = 3$. Вместе с тем, при $L/W = 2,5$ величина S_I всего на 2,5% меньше указанного значения насыщения и составляет 68,5 В/(А·Тл), т. е. очевидно, что увеличение отношения L/W выше 2,5 не имеет смысла. Следует отметить, что на практике обычно используют соотношение $L/W = 2-3$.

На рис. 3 представлены результаты моделирования зависимости напряжения Холла от величины магнитного поля, откуда видно, что магнитная чувствительность исследуемой структу-

ры остается постоянной при различных значениях входного тока I . Для повышения напряжения Холла значение I следует увеличить (поскольку V_X пропорционально I). Так, при повышении I от 0,2 до 0,6 мА напряжение Холла V_X увеличивается в 3 раза, а при его повышении до 1,0 мА значение V_X увеличивается до 5 раз.

На рис. 2, б представлена зависимость магнитной чувствительности датчика Холла по току от температуры при значении магнитного поля 0,1 Тл и входного тока 1,0 мА. Ее величина изменяется в диапазоне от 66,4 до 71,9 В/(А·Тл) при увеличении температуры от комнатной до 375°C.

С использованием линейной множественной регрессии рассчитано значение температурного коэффициента магнитной чувствительности по току. Оно составило 0,0273%/°C, что свидетельствует о высокой эффективности предлагаемой конструкции по сравнению с традиционными решениями датчиков Холла в диапазоне низких температур.

Поскольку величины G и r_X в уравнении (2) не зависят от температуры, небольшая темпера-

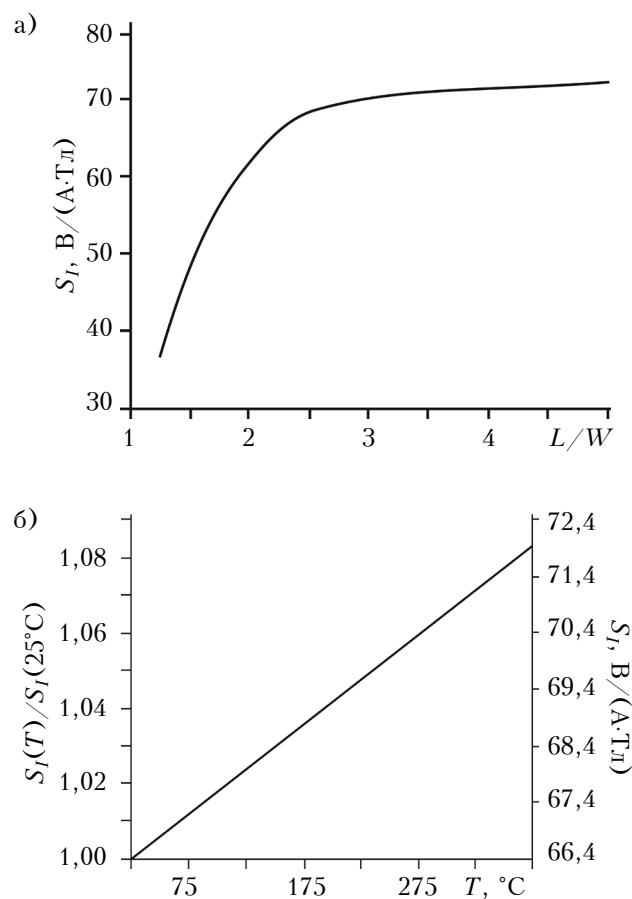


Рис. 2. Зависимость чувствительности по току S_I от отношения L/W (а) и от температуры T (б) датчика Холла при $I = 1,0$ мА и $B = 0,1$ Тл (шкалы на б: слева — относительные значения, справа — абсолютные)

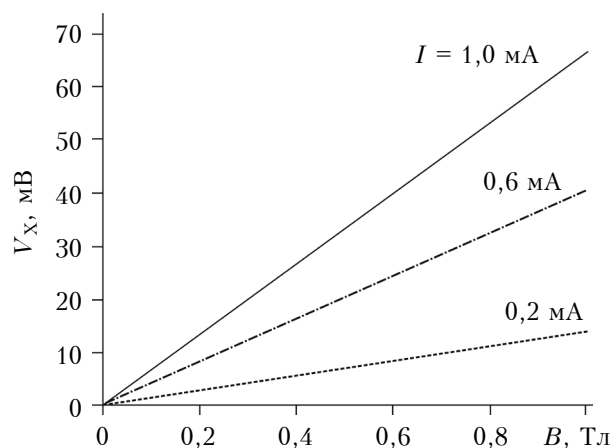


Рис. 3. Зависимости напряжения Холла V_X от магнитного поля B при различных значениях входного тока

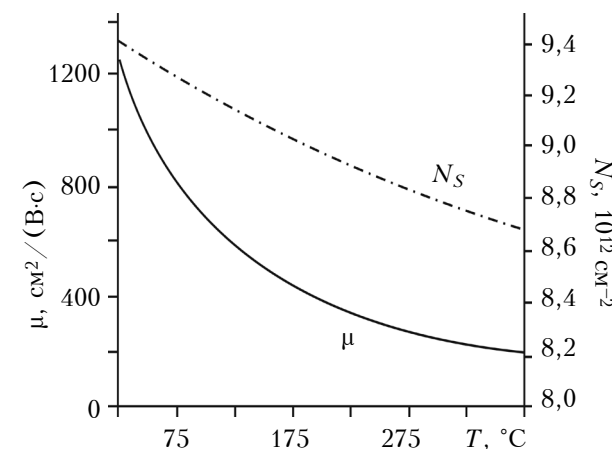


Рис. 4. Зависимость подвижности μ и концентрации N_S электронов от температуры T

Конструктивные параметры и полученные при комнатной температуре электрические характеристики различных датчиков Холла

Структура	$W \times L$, мкм	N_S , см ⁻²	TC_I , %/°C	S_I , В/(А·Тл)	Источник
AlGaIn/GaN	50×50	$1,04 \cdot 10^{13}$	+0,05	77,0	[3]
	300×300	$1,15 \cdot 10^{13}$	+0,01	54,5	[2]
AlGaAs/GaAs	50×50	$1,83 \cdot 10^{12}$	-1,38	2540,0	[3]
	70×210	$2,0 \cdot 10^{12}$	-0,08	200,0	Tech. GmbH & Co. KG
КНИ	500×500	$6,5 \cdot 10^{14}$	-0,27	55,0	[10]
InAs/GaSb	1000×1000	$5,9 \cdot 10^{15}$	—	357,0	[11]
AlGaIn/GaN	25×50	$9,4 \cdot 10^{12}$	+0,02	66,4	Данная работа

турная зависимость магнитной чувствительности достигается в основном за счет уникальных транспортных свойств AlGaIn/GaN-гетероперехода. С целью объяснения физической природы зависимости чувствительности датчика Холла от температуры выполнено моделирование температурных зависимостей концентрации и подвижности носителей заряда.

Из рис. 4 видно, что при повышении температуры AlGaIn/GaN-гетероперехода от 27 до 375°С подвижность и концентрация носителей уменьшаются монотонно. При комнатной температуре подвижность носителей близка к 1260 см²/(В·с) с концентрацией $9,4 \cdot 10^{12}$ см⁻². Слабая температурная зависимость магнитной чувствительности по току объясняется высокой стабильностью концентрации двумерного электронного газа на границе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Указанное изменение рабочей температуры приводит к уменьшению плотности носителей заряда примерно на 8%, что объясняет незначительное увеличение магнитной чувствительности по току S_I .

В таблице представлены электрические характеристики различных конструкций датчиков Холла, представленные в некоторых литературных источниках, в сравнении с результатами компьютерного моделирования, проведенного в данной работе. Здесь видно, что датчик Холла предлагаемой конструкции, обладая наименьшими геометрическими размерами, обеспечивает наилучшую магнитную чувствительность и температурный коэффициент магнитной чувствительности.

Заключение

Таким образом, исследования электрических и магнитных характеристик датчика Холла предлагаемой конструкции на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN показали его работоспособность при высоких температурах. Магнитная чувствительность датчика стабильна в диапазоне температур от 27 до 375°С и изменяется от 66,4 до 71,9 В/(А·Тл), а температурный коэффициент магнитной чувствительности составляет 0,0273%/°С.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350°С диапазоном рабочих температур // Письма в Журнал технической физики. — 2016. — Т. 42, вып. 2. — С. 30–36.
2. Lu H., Sandvik P., Vertiatichikh A., Tucker J., Elasser A. High temperature Hall effect sensors based on AlGaIn/GaN heterojunctions // Journal of Applied Physics. — 2006. — Vol. 99. — P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2201339>
3. Oszwaldowski M., Berus T. Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications // Thin Solid Films. — 2006. Vol. 515. — P. 26920–2695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.023>
4. Oszwaldowski M., Berus T. Temperature coefficients of Hall sensors made of InSb/GaAs epitaxial layers // Sensors and Actuators A: Physical. — 2007. — Vol. 133. — P. 23–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.037>
5. Koide S., Takahashi H., Abderrahmane A. Shibasaki I., Sandhu A. High Temperature Hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT structures // Journal of Physics: Conference Series 352. — 2012. — P. 1–4. — <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012009>
6. Patrick M., Thomas P., Richard G. High temperature electronics. — New York: CRC Press, Inc. — 1997.
7. Robert J., Contreras S., Camassel J., Pernot J. 4H-SiC: A material for high temperature Hall sensor // Sensors and Actuators A: Physical. — 2002. — Vol. 97–98. — P. 27–32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00812-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00812-3)
8. Consejo Ch., Contreras S., Konczewicz L., Lorenzini P., Cordier Y., Skierbiszewski C., Robert J. High temperature electrical investigation of (Al,Ga)N/GaN heterostructures Hall sensor applications // Phys. Stat. Sol. — 2005. — Vol. 2. — P. 1438–1443. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200460482>
9. Bouguen L., Contreras S., Jouault B., Konczewicz L., Camassel J., Cordier Y., Azize M., Chenot S., Baron N. Investigation of AlGaIn/AlN/GaN heterostructures for magnetic sensor application from liquid helium temperature to 300°С // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 92. — P.043504-1–043504-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2838301>
10. Paun M., Udrea F. Investigation into the capabilities of Hall cells integrated in a non-fully depleted SOI CMOS technological process // Sensors and Actuators A: Physical. — 2016. Vol. 242. — P. 43–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.014>
11. Jakub J., El-Ahmar S., Oszwaldowski M. Hall Sensors for Extreme Temperatures // Sensors. — 2011. — Vol. 11. — P. 876–885. — <http://dx.doi.org/10.3390/s110100876>
12. <http://www.silvaco.com/>

Дата поступления рукописи
в редакцию 20.02 2017 г.

В. Р. СТЕМПИЦЬКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, м. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN

Представлено результати досліджень характеристик датчика Холла запропонованої конструкції на основі гетероструктури AlGaIn / GaN з різними геометричними параметрами активної області, який функціонує в діапазоні температури від -25 до 400°C . Дослідження виконано з використанням програмних засобів приборно-технологічного моделювання. Активним шаром датчика є область двовимірного електронного газу, яка формується між бар'єрним шаром $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ і нелегованим каналним шаром GaN. Отримані результати (магнітна чутливість по струму $66,4 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ при кімнатній температурі, температурний коефіцієнт магнітної чутливості $0,0273\%/^{\circ}\text{C}$) свідчать про перспективність запропонованого рішення для практичного використання.

Ключові слова: високотемпературний датчик Холла, гетероструктури AlGaIn/GaN, комп'ютерне моделювання.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.28
UDC 621.382

V. R. STEPITSKY, DAO DINH HA

Republic of Belarus,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

INVESTIGATION OF ELECTRIC AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE HALL SENSOR BASED ON AlGaIn/GaN HETEROSTRUCTURE

The paper presents research results on the characteristics of Hall sensor based on the AlGaIn/GaN heterostructure with various geometric parameters of the active region operating in the temperature range from -25 to 400°C . The research was performed using device-technological simulation. The active layer of the proposed structure is a two-dimensional electron gas region, which is formed between the barrier layer $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ and the undoped GaN channel layer. The results (room temperature current-related magnetic sensitivity $66.4 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{T})$ and very low temperature cross sensitivity of $0,0273\%/^{\circ}\text{C}$) indicate the prospects of the proposed solutions for the practical use.

Key words: high-temperature Hall sensor, AlGaIn/GaN heterostructures, computer simulation.

REFERENCES

1. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. [Thin-film silicon magnetosensitive field-effect transistor Hall type with an extended operating temperature range up to 350°C]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 30-36. (Rus)
2. Lu H., Sandvik P., Vertiatchikh A., Tucker J., Elasser A. High temperature Hall effect sensors based on AlGaIn/GaN heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 99, pp. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2201339>
3. Oszwaldowski M., Berus T. Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications. *Thin Solid Films*, 2006, vol. 515, pp. 2692-2695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.023>
4. Oszwaldowski M., Berus T. Temperature coefficients of Hall sensors made of InSb/GaAs epitaxial layers. *Sensors and Actuators*, 2007, vol. 133, pp. 23-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.037>
5. Koide S., Takahashi H., Abderrahmane A., Shibasaki I., Sandhu A. High Temperature Hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT Structures. *Journal of Physics: Conference Series* 352, 2011, vol. 11, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012009>
6. Patrick M., Thomas P., Richard G. *High temperature electronics*. New York, CRC Press, Inc, 1997, 352 p.
7. Robert. J., Contreras S., Camassel J., Pernot J. 4H-SiC: A material for high temperature Hall sensor. *Sensors and Actuators*, 2002, vol. 97-98, P. 27-32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00812-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00812-3)
8. Consejo. Ch., Contreras S., Konczewicz L., Lorenzini P., Cordier Y., Skierbiszewski C., Robert J. High temperature electrical investigation of (Al,Ga)N/GaN heterostructures Hall sensor applications. *Phys. Stat. Sol.*, 2005, vol. 2, pp. 1438-1443. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200460482>
9. Bouguen. L., Contreras S., Jouault B., Konczewicz L., Camassel J., Cordier Y., Azize M., Chenot S., Baron N. Investigation of AlGaIn/AlN/GaN heterostructures for magnetic sensor application from liquid helium temperature to 300°C . *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, pp. 043504-1-043504-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2838301>
10. Paun M., Udrea F. Investigation into the capabilities of Hall cells integrated in a non-fully depleted SOI CMOS technological process. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 242, pp. 43-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.014>
11. Jakub J., El-Ahmar S., Oszwaldowski M. Hall Sensors for Extreme Temperatures. *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 876-885. <http://dx.doi.org/10.3390/s110100876>
12. <http://www.silvaco.com/>

*К. т. н. В. П. РЕВА, С. В. КОРИНЕЦ, А. Г. ГОЛЕНКОВ, С. В. САПОН, А. М. ТОРЧИНСКИЙ,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ*

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ПЗС-ФОТОМАТРИЦЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖЕНИЕМ

Описаны принципы работы фотоматриц видимого излучения и ближнего инфракрасного диапазона, спроектированных на основе приборов с зарядовой связью с электронным умножением (ПЗС-ЭУ), и обсуждена архитектура построения таких матриц. Приведено краткое описание технологии изготовления фотоматриц ПЗС-ЭУ, а также некоторые параметры спроектированных и изготовленных экспериментальных образцов фотоматриц формата 640×512.

Ключевые слова: ПЗС-фотоматрицы, электронное умножение, ближний ИК-диапазон, видимое излучение.

В последнее десятилетие в технике получения изображений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах оптического спектра в условиях сверхнизкой освещенности появились новые решения — приборы с зарядовой связью с электронным умножением (**ПЗС-ЭУ**), основанные на использовании лавинного умножения носителей в ПЗС-фотоматрицах. Применение лавинного умножения усиливает фотосигнал в тысячи раз и позволяет регистрировать единичные фотоны. Благодаря этому стало возможным получение качественных изображений при меньших затратах на изготовление приборов ночного видения (например, электронно-оптических преобразователей). Матрицы ПЗС-ЭУ являются твердотельным аналогом фотоэлектронных преобразователей и изготавливаются по унифицированным технологическим процессам интегральной технологии. Изображения, полученные камерой с такой матрицей, имеют обычный вид и не требуют специальной подготовки оператора для распознавания объектов в отличие, например, от тепловизионных камер видения.

Принцип работы ПЗС-ЭУ

После изобретения в 1969 г. В. Бойлем и Дж. Смитом приборов с зарядовой связью (см., напр., [1]) возникла проблема повышения их чувствительности. Основное функциональное назначение фоточувствительных ПЗС заключается в преобразовании фотосигналов в последовательность пакетов электрических зарядов с их последующей обработкой для получения и хра-

нения изображений. Ограничение чувствительности обычных ПЗС обусловлено тем, что при преобразовании заряда в напряжение в выходном каскаде шум выходного усилителя, в зависимости от выходной емкости, составляет десятки электронов, что и ограничивает чувствительность ПЗС. Уменьшение же выходной емкости (для уменьшения числа шумовых электронов) затруднительно из-за геометрических (конструктивно-технологических) ограничений технологий их изготовления [2].

Увеличение фоточувствительности ПЗС-матриц оказалось возможным при использовании эффекта лавинного умножения электронов, переносящих зарядовые пакеты. Этот эффект впервые описан в [3]. Идея увеличения фотогерированного заряда за счет лавинного умножения электронов до преобразования его в напряжение была выдвинута в 1991 г. [4], а впервые реализована в 2001 г. [5].

Заряд может быть увеличен за счет образования между двумя затворами ПЗС области с сильным электрическим полем: когда электроны проходят через эту область, их энергия возрастает, и при их рассеянии на кристаллической решетке возможно появление дополнительных «сигнальных» электронов вследствие ударной ионизации [6, 7].

Для реализации процесса умножения электронов в конструкции ПЗС-ЭУ имеется дополнительный электрод, на который подается относительно высокое напряжение, не используемое в обычных ПЗС. Его величина зависит от кристаллографической ориентации материала подложки (в данном случае кремний) и находится в пределах 30—50 В.

Авторы выражают благодарность А. С. Станиславскому и С. Е. Духнину за помощь в проведении ряда экспериментов.

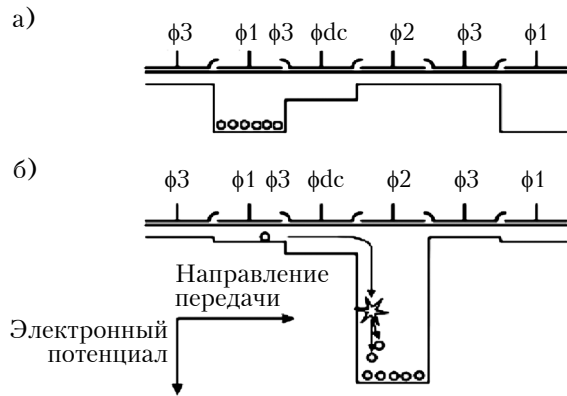


Рис. 1. Процесс лавинного умножения в ПЗС-ЭУ с трехфазной структурой [8]: ф1, ф2, ф3 — электроды фаз горизонтального регистра переноса заряда; фdc — электрод, находящийся под постоянным напряжением

Процесс реализации ударной ионизации в структурах ПЗС-ЭУ возможен в различных конструктивных решениях, например со скрытым каналом, с виртуальной и обычной фазой и др. На **рис. 1** этот процесс показан для трехфазной структуры, которая была использована при разработке и исследовании матриц ПЗС-ЭУ в данной работе.

Быстрое распространение в последние годы использования ПЗС-ЭУ в системах видения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, а также применение, например, в астрономии, при спектроскопических исследованиях, в системах безопасности и др., обусловлено возможностью регистрации с их помощью излучения вплоть до нескольких фотонов и получения изображений в условиях низкой и сверхнизкой освещенности (до 10^{-4} лк, облачная ночь, в обычных фото-ПЗС — до $5 \cdot 10^{-2}$ лк) [9–11].

Коэффициент умножения для одной ячейки ПЗС-ЭУ составляет доли процента. Большие его значения в отдельных каскадах могут привести к необратимым процессам в микросхемах вплоть до разрушения. Поэтому для заметного усиления слабых сигналов (увеличения электронных пакетов) применяют многокаскадное последовательное усиление, когда число каскадов достигает нескольких сотен и даже тысяч. Если коэффициент усиления в одном каскаде умножения $K \approx 1,025$, то при числе каскадов $N = 300$ общий коэффициент умножения $K_{ЭУ} \approx 1650$ при высокой скорости считывания информации.

При всей своей привлекательности использования матриц ПЗС-ЭУ в приборах регистрации сигналов в условиях низкой освещенности технологии ПЗС-ЭУ имеют ряд недостатков, сдерживающих их распространение. Например, в системах видения и регистрации слабых потоков излучения матрицы ПЗС-ЭУ желательно

использовать при температурах, ниже комнатной. Снижение температуры сенсора на 20°C дает примерно десятикратное уменьшение темновых токов, а значит, и повышение пороговой чувствительности. Для понижения температуры ПЗС-ЭУ используются, как правило, термоэлектрические устройства, которые могут обеспечить снижение температуры примерно на 30°C при однокаскадном исполнении.

Следует отметить, что в связи с повышенной сложностью изготовления матриц ПЗС-ЭУ их стоимость может быть в несколько раз выше, чем обычных. Кроме этого, поддержание постоянного высокого напряжения на электродах регистра умножения сказывается и на жизненном цикле, и на энергопотреблении матриц ПЗС-ЭУ. Однако, несмотря на это, для получения изображений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра в условиях низкой и сверхнизкой освещенности ПЗС-ЭУ-матрицы незаменимы.

Результаты исследований

Твердотельные матричные ПЗС-ЭУ, кроме случаев использования последовательных регистров умножения, по своей архитектуре не отличаются от фоточувствительных ПЗС-приборов [12]. В настоящей работе при изготовлении схем ПЗС-ЭУ формата 640×512 (размер одного чувствительного элемента 16×16 мкм) использовалась n -канальная МОП-технология с двухслойным диэлектриком ($\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$) и скрытым ка-

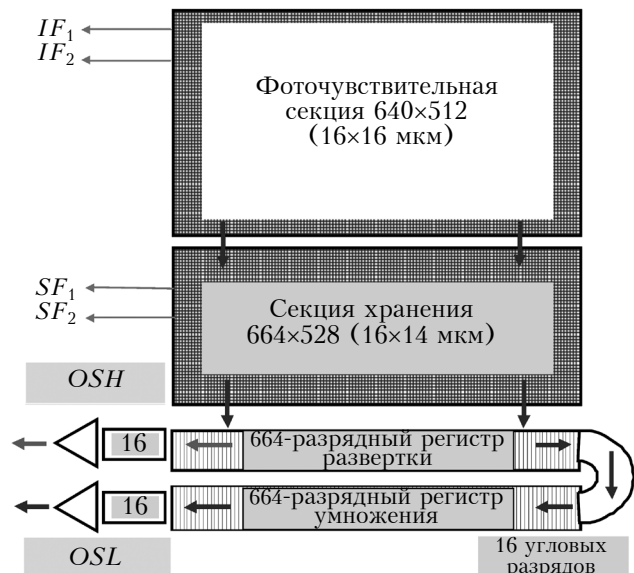


Рис. 2. Блок-схема матричного ПЗС-ЭУ формата 640×512 : IF_1, IF_2 — электроды фазы 1 и фазы 2 фотоувствительной части матрицы; SF_1, SF_2 — электроды фазы 1 и фазы 2 области сохранения; OSH (5 мкВ/электрон), OSL (1,2 мкВ/электрон) — усилители регистров считывания и умножения (в скобках указаны значения коэффициентов преобразования)

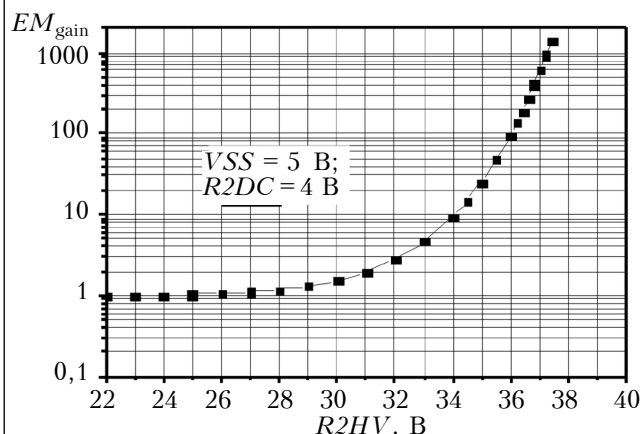


Рис. 3. Зависимость коэффициента умножения от приложенного напряжения усиления для матрицы ПЗС-ЭУ формата 640×512

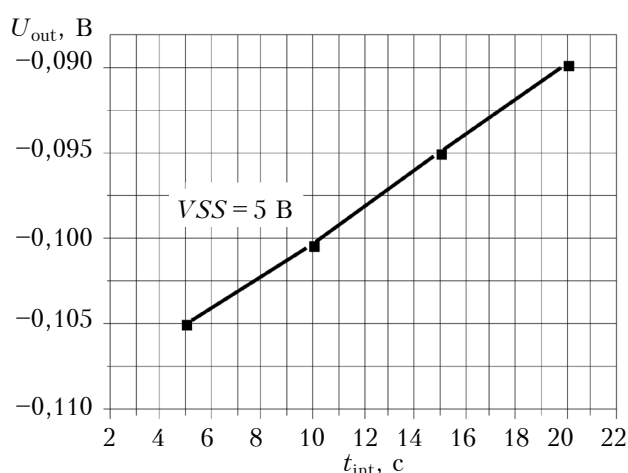


Рис. 4. Зависимость среднего темного выходного сигнала матрицы ПЗС-ЭУ формата 640×512 от времени накопления (в отсутствие освещенности) при $T = 20^\circ\text{C}$

налом n -типа с проектными нормами 2,5 мкм, четырьмя уровнями поликремния и двумя уровнями металла. Матрица ПЗС-ЭУ спроектирована по архитектуре с переносом кадра (*frame transfer CCD*). Частота вывода видеосигнала $\nu \approx 11$ МГц, что достаточно для получения частоты кадров $f \approx 25$ Гц.

Матрица ПЗС-ЭУ состоит из двух секций: фоточувствительной и секции сохранения информации об уровне сигналов, а также последовательных регистров развертки и умножения (рис. 2). Последовательные регистры имеют дополнительные служебные разряды — угловые для изменения направления переноса и выходные для синхронизации функционирования схемы. Для возможности использования матрицы ПЗС-ЭУ в качестве обычной ПЗС-матрицы сделан дополнительный вывод.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента умножения EM_{gain} от приложенного напряжения усиления $R2HV$ при регулируемом посто-

янном напряжении смещения подложки матрицы $VSS = 5$ В и постоянном напряжении регистра умножения $R2DC = 4$ В. Здесь видно, что при $R2HV < 28$ В коэффициент EM_{gain} практически равен 1, а при увеличении $R2HV$ от 28 до 37 В значение EM_{gain} резко возрастает, достигая 1000.

Из приведенных на рис. 4 данных видно, что значение среднего темного выходного сигнала U_{out} исследуемой матрицы ПЗС-ЭУ (а значит, и число шумовых электронов) линейно зависит от

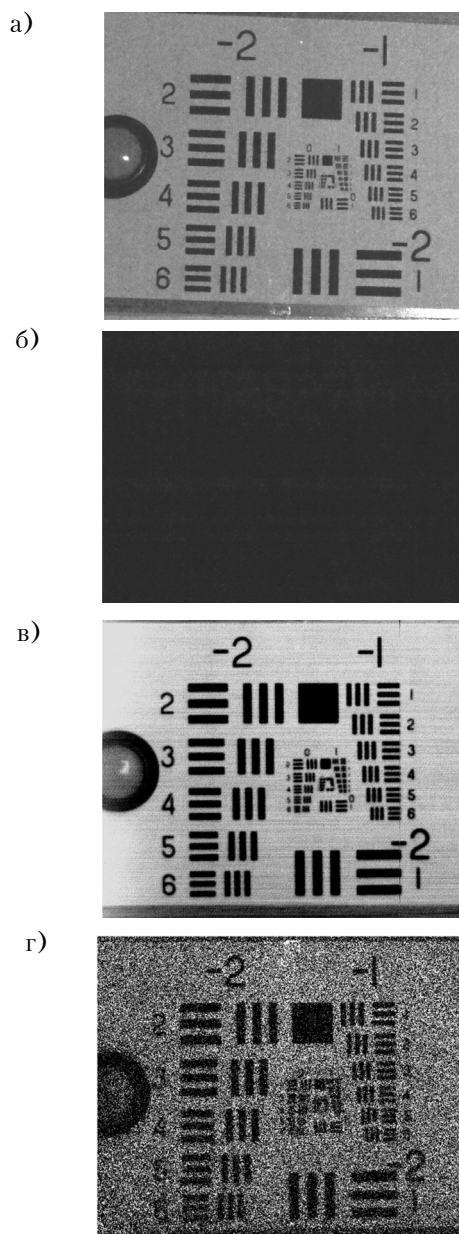


Рис. 5. Изображения, полученные с помощью стандартной камеры Nikon D3100 (а, б) и макета камеры с матрицей ПЗС-ЭУ 640×512 с $EM_{\text{gain}} = 500$ при $T = 20^\circ\text{C}$ (в, г) при экспозиции 0,1 с и различной освещенности объекта/матрицы ПЗС-ЭУ: а, в — 0,3 лк / 0,015 лк; б, г — 0,01 лк / $5 \cdot 10^{-4}$ лк (В левой части тестовой таблицы настройки изображений находится люксметр)

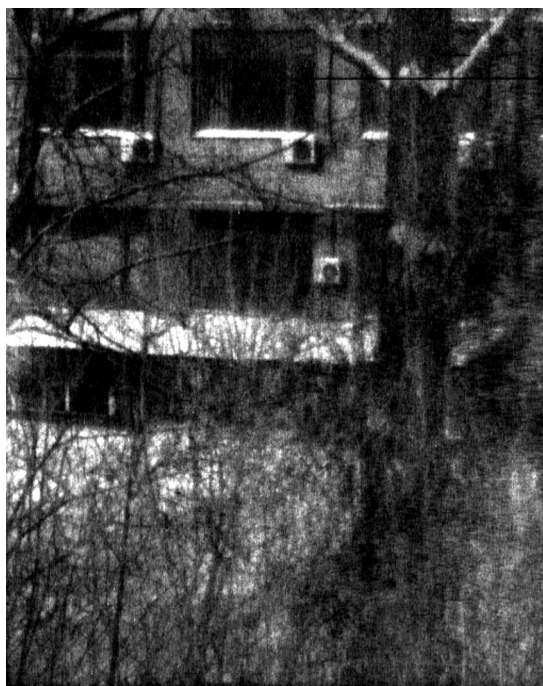


Рис. 6. Изображение, полученное с помощью разработанной матрицы ПЗС-ЭУ ночью при освещенности около $5 \cdot 10^{-4}$ лк

времени накопления t_{int} . При обычной освещенности (днем) шумовое напряжение такого уровня не сказывается на качестве получаемого изображения. В случаях же низкой и сверхнизкой освещенности и использовании больших значений коэффициентов умножения ($EM_{\text{gain}} = 100 - 1000$) темновые токи могут существенно влиять на качество получаемых изображений.

На рис. 5 показаны изображения, полученные при различной освещенности с помощью стандартной фотокамеры Nikon D3100 и макета камеры с матрицей ПЗС-ЭУ 640×512 при использовании в обоих случаях одного и того же объектива. Здесь продемонстрировано существенное различие в детализации полученных изображений и возможность получения более полной информации об объекте наблюдения в условиях малой освещенности с помощью камеры с ПЗС-ЭУ матрицей. При этом следует отметить, что освещенность матрицы ПЗС-ЭУ зависит от качества применяемого объектива.

Для демонстрации возможностей разработанной матрицы ПЗС-ЭУ на рис. 6 приведено изображение строения, полученное при ее использовании ночью при освещенности около $5 \cdot 10^{-4}$ лк, которое невозможно получить в таких условиях с помощью фотокамеры с обычной ПЗС или КМОП-матрицей.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования экспериментальных образцов фотоматри-

цы ПЗС-ЭУ формата 640×512 показали, что повышение амплитуды тактовых импульсов регистра умножения выше 27 В приводит к возникновению эффекта электронного умножения. Коэффициент умножения разработанных матриц ПЗС-ЭУ сильно зависит от амплитуды тактовых импульсов и при 37 В его значение превышает 1000, что позволяет получать изображения в условиях малой и сверхмалой освещенности вплоть до $5 \cdot 10^{-4}$ лк.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Boyle W.S. and Smith G.E. Charge-coupled semiconductor devices // Bell Systems Techn. J. — 1970. — Vol. 49, iss. 4. — P. 587–593. — <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x>
2. Janesick J.R. Scientific charge-coupled devices. — Bellingham, WA: SPIE Press, 2001.
3. Madan S.K., Bhaumik B., Vasi J.M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1983. — Vol. 30, iss. 6. — P. 694–699. — <http://dx.doi.org/10.1109/T-ED.1983.21191>
4. Hynecek J. CCM-A new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors // IEEE Trans. Electron Devices. — 1992. — Vol. 39, iss. 8. — P. 1972. — 1975. — <http://dx.doi.org/10.1109/16.144694>
5. Pat. US 20010031517A1. Process for fabrication of split-gate virtual phase charge coupled devices. Jaroslav Hynecek.
6. Pool P.J., Morris D.G., Burt D.J. et al. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation // Proc. SPIE. — 2005. — Vol. 5902, #59020A. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.621627>
7. O'Grady A.A. comparison of EMCCD, CCD and emerging technologies optimized for low light spectroscopy applications // Proc. SPIE. — 2006. — Vol. 6093, #60930S. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.644752>
8. Zhang W.W., Chen Q. Optimum signal-to-noise ratio performance of electron multiplying charge coupled devices // Int. J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. — 2009. — Vol. 3, N6. — P. 1285–1289. — International Science Index: scholar.waset.org/1999.5/2103
9. Daigle O., Djazovski O., Laurin D. et al. Characterization results of EMCCDs for extreme low-light imaging // Proc. SPIE. — 2012. — Vol. 8453, # 845303. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.926385>
10. Mackay C., Weller K., Suess F. Photon counting EMCCDs: New opportunities for high time resolution astrophysics // Proc. SPIE. — 2012. — Vol. 8453, # 845302. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.924642>
11. Rauscher B.J., Bolcar M.R., Clampin M. et al. ATLAST detector needs for direct spectroscopic biosignature characterization in the visible and near-IR // Proc. SPIE. — 2015. — Vol. 9602, # 96020D. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.2186554>
12. Hynecek J. Impactron — a new solid state image intensifier // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2001. — Vol. 48, iss. 10. — P. 2238–2241. — <http://dx.doi.org/10.1109/16.954460>

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.01 2017 г.

В. П. РЕВА, С. В. КОРИНЕЦЬ, О. Г. ГОЛЕНКОВ, С. В. САПОН,
А. М. ТОРЧИНСЬКИЙ, В. В. ЗАБУДСЬКИЙ, Ф. Ф. СИЗОВ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

ПЗЗ-ФОТОМАТРИЦІ З ЕЛЕКТРОННИМ МНОЖЕННЯМ

Описано принципи роботи фотоматриці видимого випромінювання і ближнього інфрачервоного діапазону, спроектованих на основі приладів із зарядним зв'язком з електронним множенням (ПЗЗ-ЕМ), та обговорено архітектуру побудови таких матриць. Наведено короткий опис технології виготовлення фотоматриці ПЗЗ-ЕМ, а також деякі параметри спроектованих і виготовлених експериментальних зразків фотоматриці формату 640×512.

Ключові слова: ПЗЗ-фотоматриці, електронне множення, ближній ІЧ-діапазон, видиме випромінювання.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.33

UDC 621.383.72

V. P. REVA, S. V. KORINETS, A. G. GOLENKOV,
S. V. SAPON, A. M. TORCHINSKY,
V. V. ZABUDSKY, F. F. SIZOV

Ukraine, Kiev, Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine

E-mail: sizov@isp.kiev.ua

CCD PHOTOMATRIXES WITH ELECTRON MULTIPLICATION

Electron multiplication charge coupled devices (EMCCD) technology is an innovation first introduced slightly more than a decade ago. The EMCCD is an image sensor that is capable of detecting an isolated photon without an image intensifier. It is achieved by electron multiplication circuit that is built in the chip of ordinary CCD.

Cameras with EMCCD arrays overcome limitations of getting high sensitivity with high frame rate. Traditional CCD cameras can be highly sensitive in the visible part of spectrum but at the expense of low frame rate. EMCCD can operate at very faint illumination conditions both in visible and near infrared regions.

The paper presents a short technological description of EMCCD 640×512 arrays manufacturing and some parameters of the arrays that were designed and manufactured. It was shown that multiplication coefficient depends much on applied amplification voltage and can achieve 1000. Also it is shown that images can be obtained at low illumination conditions (illumination at EMCCD is near $5 \cdot 10^{-4}$ lx).

Keywords: CCD photomatrix, electronic multiplication, near infrared, visible light.

REFERENCES

1. Boyle W.S., Smith G.E. Charge-coupled semiconductor devices. *Bell Systems Techn. J.*, 1970, vol. 49, iss. 4, pp. 587-593. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x>
2. Janesick J.R. Scientific charge-coupled devices. Bellingham, WA, SPIE Press, 2001, 907 p.
3. Madan S.K., Bhaumik B., Vasi J.M. Experimental observation of avalanche multiplication in charge-coupled devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, vol. 30, iss. 6, pp. 694-699. <http://dx.doi.org/10.1109/T-ED.1983.21191>
4. Hynecsek J. CCM-A new low-noise charge carrier multiplier suitable for detection of charge in small pixel CCD image sensors. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, vol. 39, iss. 8, pp. 1972-1975. <http://dx.doi.org/10.1109/16.144694>
5. Pat. US 20010031517A1. Process for fabrication of split-gate virtual phase charge coupled devices. Jaroslav Hynecsek.
6. Pool P.J., Morris D.G., Burt D.J., Bell R., Holland A.D. et al. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5902, #59020A. <http://dx.doi.org/10.1117/12.621627>
7. O'Grady A.A. comparison of EMCCD, CCD and emerging technologies optimized for low light spectroscopy

applications. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6093, #60930S. <http://dx.doi.org/10.1117/12.644752>

8. Zhang W.W., Chen Q. Optimum signal-to-noise ratio performance of electron multiplying charge coupled devices. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2009, vol. 3, no.6, pp. 1285-1289. International Science Index: scholar.waset.org/1999.5/2103

9. Daigle O., Djazovski O., Laurin D., Doyon R., Artigau E. Characterization results of EMCCDs for extreme low-light imaging. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8453, # 845303. <http://dx.doi.org/10.1117/12.926385>

10. Mackay C., Weller K., Suess F. Photon counting EMCCDs: New opportunities for high time resolution astrophysics. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8453, # 845302. <http://dx.doi.org/10.1117/12.924642>

11. Rauscher B.J., Bolcar M.R., Clampin M., Domagal-Goldman S.D., McElwain M.W. et al. ATLAST detector needs for direct spectroscopic biosignature characterization in the visible and near-IR. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9602, # 96020D. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2186554>

12. Hynecsek J. Impactron - a new solid state image intensifier, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, iss. 10, pp. 2238-2241. <http://dx.doi.org/10.1109/16.954460>

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ¹, к. т. н. Ю. И. ЖУРАВЛЁВ²

Украина, ¹Одесский государственный экологический университет,

²Национальный университет «Одесская морская академия»

E-mail: gradan@ua.fm

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОИСКУ ТОКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрены возможности критериального подхода к определению токового режима работы однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства (ТЭУ) при использовании в качестве базового параметра надежности интенсивности отказов. Получены соотношения, позволяющие определить токовый режим работы ТЭУ с заданной геометрией ветвей для различных условий эксплуатации с учетом различных ограничительных требований. Проведен сравнительный анализ токовых режимов, близких к режимам максимальной энергоэффективности и минимальной интенсивности отказов, который позволяет выбрать компромиссные варианты.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждающее устройство, режим работы, показатели надежности, геометрия ветвей термоэлементов, электронные компоненты.

Для обеспечения нормального теплового режима современных теплонагруженных электронных компонентов все более широкое применение находят системы охлаждения на основе термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ) [1–6]. Среди прочих требований, предъявляемых к используемым для этих целей ТЭУ, важным является требование повышенной надежности работы.

При проектировании ТЭУ повышенной надежности обычно задаются холодопроизводительность Q_0 , температура теплопоглощающего спая T_0 и температура тепловыделяющего спая T . Кроме этого, накладываются различные ограничения: по энергопотреблению, габаритам, массе, величине рабочего тока и напряжения и наиболее важные и критичные по надежности, с учетом которых необходимо выбрать режим работы охлаждающего термоэлемента.

В литературе по термоэлектрическому охлаждению описаны характерные и компромиссные токовые режимы работы охлаждающего термоэлемента [7–11]. Рациональная область использования токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента ограничена характерными режимами максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$ и тепловой изоляции $Q_0 = 0$. При проектировании ТЭУ в режиме $Q_{0\max}$ обеспечивается минимальное количество термоэлементов при заданном сечении ветвей и их высоты, однако при этом велики энергозатраты и рабочий ток, что приводит к росту интенсивности отказов λ . Режим $Q_0 = 0$ обеспечивает только необходимый перепад температуры, что заметно сужает область его рационального использования.

Проектирование ТЭУ в режиме максимальной энергоэффективности E_{\max} позволяет свести к минимуму потребляемую мощность W , но при этом растет количество термоэлементов n и интенсивность отказов.

Проектирование ТЭУ в режиме минимальной интенсивности отказов λ_{\min} обеспечивает максимальную надежность, однако приводит к росту количества термоэлементов и потребляемой мощности.

Область токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента, в которой $B < \Theta$ (B — относительный рабочий ток; Θ — относительный перепад температуры), ранее считалась нерациональной, т. к. здесь вместе с холодильным коэффициентом E уменьшается и холодопроизводительность, что приводит к росту количества термоэлементов. Однако в некоторых случаях, когда основным требованием является уменьшение величины рабочего тока при повышенном напряжении питания и незначительном увеличении энергозатрат, такие режимы могут оказаться предпочтительными.

Таким образом, очевидно, что на выбор токового режима работы ТЭУ влияет много факторов, и в большинстве случаев необходимо учитывать взаимное влияние и весомость каждого из них. В этом случае появляется необходимость использования критериального подхода с учетом основных значимых параметров. Так, условия проектирования могут быть весьма разнообразными, изменяя одновременно несколько задаваемых величин (Q_0 , n , λ , W и т.д.), можно выбирать компромиссные режимы работы

ТЭУ. Среди ограничительных требований наиболее значимым и критичным является требование по надежности.

Целью настоящей работы является разработка критериального подхода к определению токовых режимов работы охлаждающего термоэлектрического устройства повышенной надежности при заданном сечении ветвей.

Для дальнейших вычислений будем использовать следующие известные соотношения для холодопроизводительности и относительной интенсивности отказов:

$$Q_0 = nI_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta), \quad (1)$$

$$\lambda/\lambda_0 = nB^2(\Theta + C) \frac{\left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} K_T, \quad (2)$$

где n — количество термоэлементов;
 I_{\max} — максимальный рабочий ток, $I_{\max} = \bar{\epsilon} T_0 / R$;
 R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента, $R = l / (\bar{\sigma} S)$;
 l/S — отношение высоты ветви к площади ее поперечного сечения;
 $\bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$ — усредненные значения коэффициента термоэдс и электропроводности ветви термоэлемента соответственно;
 B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;
 I — рабочий ток;
 Θ — относительный перепад температуры, $\Theta = (T - T_0) / \Delta T_{\max}$;
 ΔT_{\max} — максимальный перепад температуры, $\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$;
 \bar{z} — усредненный показатель термоэлектрической эффективности ветви термоэлемента;
 C — относительная тепловая нагрузка, $C = Q_0 / (nI_{\max}^2 R)$;
 K_T — коэффициент, учитывающий влияние пониженной температуры;
 λ_0 — номинальная интенсивность отказов ($\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч).

Поиск токовых режимов, отвечающих различным критериям

1. Определим токовый режим работы охлаждающего ТЭУ, при котором достигается максимум отношения холодопроизводительности Q_0 к интенсивности отказов λ/λ_0 либо при заданном Q_0 достигается минимум λ/λ_0 . Это требование можно записать в виде критерия

$$K_1 = \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{nI_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta) \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{nB^2(\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}. \quad (3)$$

Для упрощения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_1 к критерию Π , оперирование которым даст практически тот же результат:

$$\begin{aligned} \Pi &= K_1 \frac{K_T (\Theta + C)}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 I_{\max}^2 R} = \\ &= \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условия $\frac{d\Pi}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Π для заданного относительного перепада температуры:

$$B_{\text{опт}}^3 - 3B_{\text{опт}}^2 + B_{\text{опт}} \Theta \left(2 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (5)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима Π_{\max} представлена кривой 1 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия Π , приведены в табл. 1 и на рис. 2.

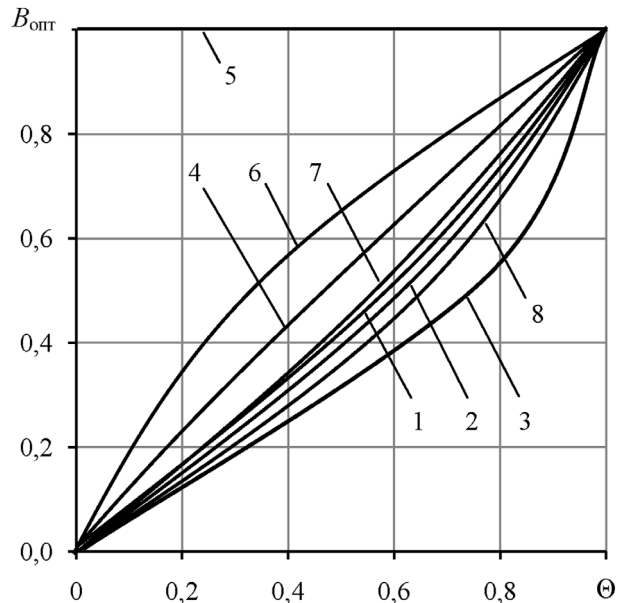


Рис. 1. Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры Θ при $T = 300$ К для различных режимов работы:

1 — Π_{\max} ; 2 — λ_{\min} ; 3 — $Q_0 = 0$; 4 — Φ_{\max} ; 5 — $Q_{0\max}$; 6 — I_{\max} ; 7 — D_{\max} ; 8 — Y_{\max}

Таблица 1

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме Π_{\max} для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	ΔT_{\max} , К	I_{\max} , А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,64	101,0	5,395	0,099	0,07	0,378	88,5	0,405	1,07	2,47	0,0006	0,0018	0,99999982
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,16	0,842	42,1	0,910	1,08	1,1	0,0149	0,0447	0,9999955
30	10,2	86,8	5,19	0,346	0,27	1,40	30,0	1,69	1,21	0,59	0,122	0,367	0,999963
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,40	2,02	28,1	3,17	1,57	0,315	0,681	2,04	0,999796
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,58	2,84	30,4	6,46	2,27	0,155	3,65	11,0	0,99890
60	9,6	66,8	4,74	0,90	0,84	4,0	60,7	24,1	20,0	0,0415	32,9	98,7	0,9902

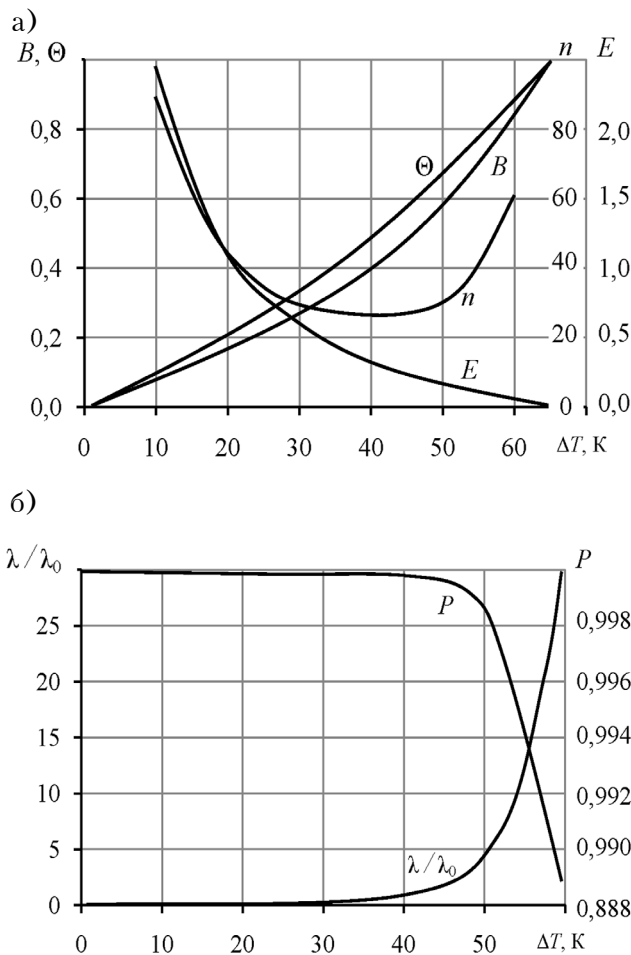


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме Π_{\max}

2. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_2 = \frac{Q_0}{n} \frac{Q_0}{\lambda / \lambda_0} = \frac{Q_0^2 \lambda_0}{n \lambda} = \frac{n^2 I_{\max}^4 R^2 (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{n^2 B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T} \quad (6)$$

Для удобства проведения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_2 к критерию Φ :

$$\Phi = K_2 \frac{K_T (\Theta + C)}{I_{\max}^4 R^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} \quad (7)$$

Из условия $\frac{d\Phi}{db} = 0$ получим соотношение для определения относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Φ для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$B_{\text{опт}}^2 \left(2 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) - 2B_{\text{опт}} \Theta - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (8)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима Φ_{\max} , который совпадает с режимом E_{\max} , представлена кривой 4 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в

Таблица 2

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме Φ_{\max} для различных значений перепада температуры при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$

$\Delta T, \text{ K}$	$R \cdot 10^3, \text{ Ом}$	$T_{\max}, \text{ K}$	$I_{\max}, \text{ A}$	Θ	$B_{\text{опт}}$	$I, \text{ A}$	$n, \text{ шт.}$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{ 1/ч}$	P
10	10,75	101,0	5,395	0,099	0,112	0,604	28,4	0,292	0,48	3,42	0,00152	0,0046	0,99999954
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,237	1,25	16,7	0,712	0,57	1,40	0,037	0,110	0,999989
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,376	1,95	13,8	1,39	0,97	0,72	0,233	0,07	0,999930
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,532	2,68	14,0	2,60	0,97	0,385	1,12	3,36	0,99966
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,709	3,48	18,4	5,57	1,60	0,18	5,0	15,0	0,9985
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,908	4,30	49,5	22,5	5,24	0,044	36,1	108,2	0,9892

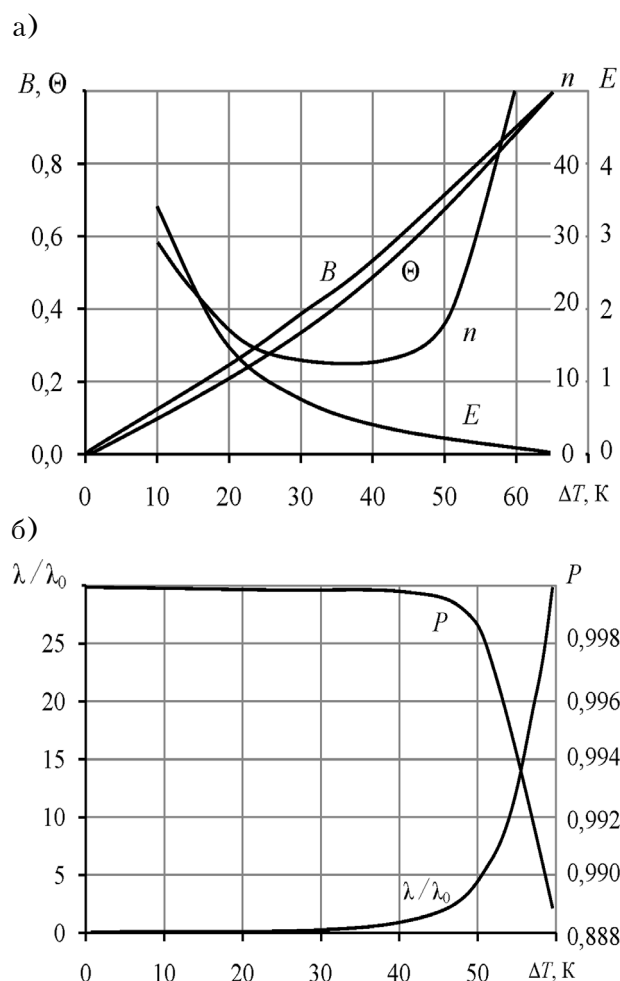


Рис. 3. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$ в режиме Φ_{\max}

режиме, соответствующем максимуму критерия Φ , приведены в табл. 2 и на рис. 3.

3. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_3 = \frac{Q_0^2}{n^2} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0^3 \lambda_0}{n^2 \lambda} = \frac{n^3 I_{\max}^6 R^3 (2B - B^2 - \Theta)^3 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{n^3 B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}. \quad (9)$$

Отметим, что этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является увеличение холодопроизводительности по сравнению с режимом Φ_{\max} (E_{\max}).

Для удобства проведения дальнейших вычислений перейдем от критерия K_3 к критерию И:

$$I = K_3 \frac{K_T (\Theta + C)}{I_{\max}^6 R^3 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^3}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \quad (10)$$

Из условия получим соотношение для определения относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия И для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$B^3 + B^2 \left(1 + 2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) - B \Theta \left(2 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (11)$$

Таблица 3

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме I_{\max} для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	T_{\max} , К	I_{\max} , А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,395	0,10	0,20	1,08	12,2	0,36	0,33	2,78	0,0016	0,0048	0,99999952
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,36	1,90	9,10	0,825	0,435	1,21	0,114	0,342	0,9999658
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,505	2,62	8,90	1,52	0,58	0,66	0,535	1,61	0,99984
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,65	3,28	10,4	2,76	0,84	0,36	1,92	5,76	0,99942
50	9,8	73,1	4,90	0,68	0,795	3,90	15,5	5,76	1,48	0,174	6,62	19,87	0,9980
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,935	4,43	47,3	22,7	5,12	0,044	38,4	115,3	0,9885

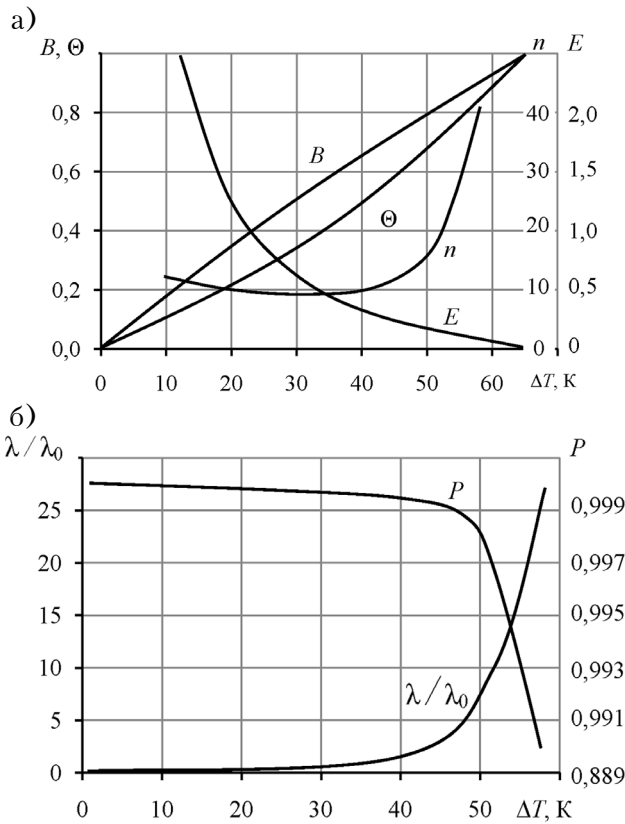


Рис. 4. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме I_{\max}

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры Θ для режима I_{\max} представлена кривой 6 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия I , приведены в табл. 3 и на рис. 4.

4. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_4 = E \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0}{W} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{Q_0^2 \lambda_0}{W \lambda}$$

$$= \frac{n^2 I_{\max}^4 R^2 (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{2n I_{\max}^2 R B \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) n B^2 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 K_T}$$

$$= \frac{I_{\max}^2 R (2B - B^2 - \Theta)^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{2B^3 (\Theta + C) \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3 K_T}, \quad (12)$$

где $W = 2n I_{\max}^2 R B \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)$ – потребляемая мощность.

Этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является уменьшение интенсивности отказов по сравнению с режимом Φ_{\max} (E_{\max}).

Перейдем от критерия K_4 к критерию D :

$$D = K_4 \frac{2K_T (\Theta + C)}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 I_{\max}^2 R B^3 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^3 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^3}. \quad (13)$$

Из условия dD/dB получим соотношение

$$2B^3 - B^2 \left(8 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) + 2B \Theta \left(3 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + 3 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (14)$$

Таблица 4

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме D_{\max} для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	T_{\max} , К	I_{\max} , А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,40	0,10	0,085	0,46	50,1	0,319	0,69	3,1	0,0008	0,0024	0,99999952
20	10,53	93,7	5,265	0,213	0,18	0,95	36,9	0,979	1,03	1,01	0,02	0,061	0,9999658
30	10,2	86,8	5,188	0,346	0,30	1,56	22,2	1,50	0,96	0,67	0,142	0,426	0,99984
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,44	2,22	21,1	2,81	1,265	0,36	0,76	2,28	0,99942
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,627	3,07	24,0	5,84	1,90	0,171	3,62	10,9	0,9980
60	9,62	66,8	4,74	0,898	0,885	4,20	52,1	22,65	5,40	0,0442	34,4	103,1	0,9885

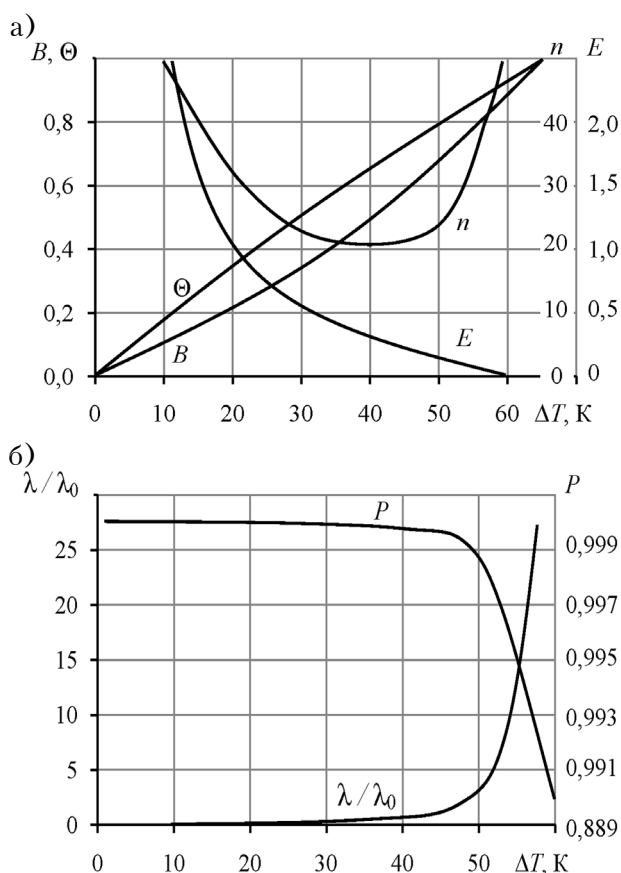


Рис. 5. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме D_{\max}

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима D_{\max} представлена кривой 7 на рис. 1.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия D_{\max} , приведены в табл. 4 и на рис. 5.

5. Определим токовый режим работы охлаждающего термоэлемента, при котором достигается максимум критерия

$$K_5 = \frac{U}{WI} \frac{Q_0}{\lambda/\lambda_0} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2 R \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}{B^4 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2 (\Theta + C) K_T}. \quad (15)$$

Этот критерий составлен для случая, когда преобладающим требованием является увеличение падения напряжения и уменьшение рабочего тока по сравнению с режимом λ_{\min} .

Перейдем от критерия K_5 к критерию Y :

$$Y = K_5 \frac{K_T (\Theta + C)}{R \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^4 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right)^2}. \quad (16)$$

Из условия $\frac{dY}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму критерия Y для заданного относительного перепада температуры Θ :

$$2B^3 - B^2 \left(5 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta\right) + 3B\Theta \left(3 - \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right) + 2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta^2 = 0. \quad (17)$$

Зависимость оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$ однокаскадного ТЭУ от относительного перепада температуры для режима Y_{\max} представлена кривой 8 на рис. 1.

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в режиме Y_{\max} для различных значений перепада температуры при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч

ΔT , К	$R \cdot 10^3$, Ом	T_{\max} , К	I_{\max} , А	Θ	$B_{\text{опт}}$	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
10	10,75	101,0	5,40	0,10	0,065	0,35	124	0,50	1,44	2,0	0,00074	0,0022	0,99999977
20	10,42	93,7	5,32	0,213	0,138	0,73	75,3	1,28	1,74	0,78	0,014	0,042	0,9999958
30	10,31	86,8	5,13	0,35	0,235	1,20	57,0	2,52	2,1	0,40	0,129	0,39	0,999961
40	10,0	79,8	5,04	0,50	0,355	1,80	46,9	4,31	2,4	0,232	0,69	2,1	0,99979
50	9,8	73,1	4,90	0,684	0,525	2,57	47,0	8,4	3,27	0,119	3,76	11,28	0,99887
60	9,62	66,8	4,74	0,9	0,790	3,74	82,8	29,1	7,8	0,034	35,3	105,8	0,9895

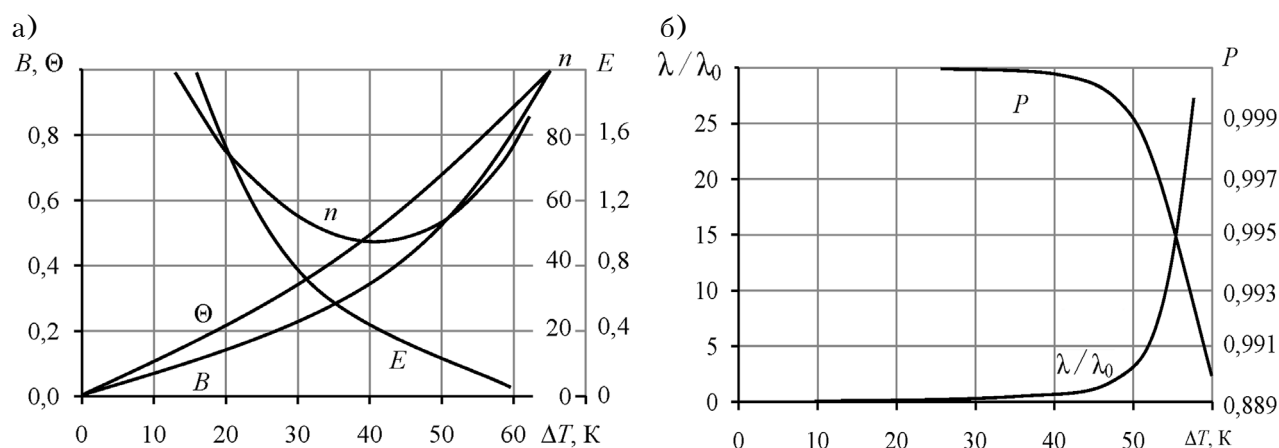


Рис. 6. Зависимость относительного рабочего тока B , относительного перепада температуры Θ , количества термоэлементов n и холодильного коэффициента E (а) и относительной интенсивности отказов λ/λ_0 и вероятности безотказной работы P (б) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 1,0$ Вт; $l/S = 10$ 1/см; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч; $t = 10^4$ ч в режиме Y_{\max}

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режиме, соответствующем максимуму критерия Y , приведены в табл. 5 и на рис. 6.

Обсуждение результатов

Анализ приведенных выше результатов расчета основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ в режимах, соответствующих максимуму различных рассмотренных критериев, при $Q_0 = 1,0$ Вт, $T = 300$ К, $l/S = 10$ 1/см, $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К показал, что во всех этих случаях с ростом перепада температуры ΔT от 10 до 60 К происходит следующее:

- уменьшаются электрическое сопротивление ветви термоэлемента R , максимальный перепад температуры ΔT_{\max} , максимальный рабочий ток I_{\max} , холодильный коэффициент E ;

- увеличиваются относительный рабочий ток B , а следовательно и величина рабочего тока I , относительный перепад температуры Θ , падение напряжения U ;

- зависимость количества термоэлементов n от ΔT проходит через минимум в области значений $\Delta T = 30 - 40$ К;

- увеличивается интенсивность отказов λ/λ_0 и, соответственно, уменьшается вероятность безотказной работы P .

Для возможности сравнения характеристик однокаскадного ТЭУ, работающего в различных токовых режимах, в табл. 6 приведены основные параметры и показатели надежности, полученные при $\Delta T = 40$ К.

При выборе токового режима работы однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства необходимо проводить комплексную оценку основных характеристик ТЭУ, таких как холодильный коэффициент E , холодопроизводительность Q_0 , интенсивность отказов λ/λ_0 , количество термоэлементов n , величина рабочего тока I , падение напряжения U и т. д. Поскольку при проектировании ТЭУ часто используется токовый режим работы E_{\max} (в нашем случае это режим Φ_{\max}), обеспечивающий максимальную энергетическую эффективность, в табл. 7 приведены данные, которые отражают отличие основных параметров ТЭУ в различных токовых режимах работы от параметров в режиме Φ_{\max} .

Таблица 6

Основные параметры и показатели надежности однокаскадного ТЭУ, полученные в различных токовых режимах при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 1,0 \text{ Вт}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $l/S = 10 \text{ 1/см}$; $\bar{z}_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$; $t = 10^4 \text{ ч}$

Режим работы	B	I , А	n , шт.	W , Вт	U , В	E	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P
$Q_{0\max}$	1,0	5,04	7,9	4,64	0,92	0,22	8,03	24,1	0,9976
I_{\max}	0,65	3,3	10,4	2,80	0,84	0,36	5,3	10,5	0,99895
Φ_{\max}	0,53	2,7	14,0	2,60	0,97	0,39	1,12	3,4	0,99966
D_{\max}	0,44	2,2	21,1	2,80	1,27	0,36	0,76	2,3	0,99977
Π_{\max}	0,40	2,0	28,1	3,20	1,57	0,32	0,68	2,0	0,99980
λ_{\min}	0,39	1,96	30,8	3,33	1,70	0,30	0,665	1,996	0,99980
Y_{\max}	0,36	1,81	43,5	4,1	2,27	0,24	0,675	2,03	0,99980

Таблица 7

Процентное отличие параметров однокаскадного ТЭУ в различных токовых режимах от параметров в режиме Φ_{\max} (или E_{\max})

Режим работы	Отличие в % сравниваемых параметров:				
	B	n , шт.	U , В	E	λ/λ_0
I_{\max}	+22	-35	-15	-8	+370
D_{\max}	-20	+51	+31	-8	-47
Π_{\max}	-32	+100	+63	-22	-65
Y_{\max}	-47	+210	+130	-62	-66
λ_{\min}	-36	+120	+75	-30	-68

Из анализа приведенных в табл. 7 данных можно дать следующие рекомендации по выбору токового режима работы однокаскадного ТЭУ вместо традиционно используемого режима E_{\max} в зависимости от преобладающих требований:

- 1) сокращение количества термоэлементов — режим I_{\max} ;
- 2) уменьшение величины рабочего тока и интенсивности отказов — режим D_{\max} ;
- 3) уменьшение величины рабочего тока, увеличение падения напряжения и уменьшение интенсивности отказов — режим Π_{\max} ;
- 5) высокая надежность при значительном уменьшении рабочего тока и увеличении падения напряжения — режим Y_{\max} ;
- 4) максимальная надежность при малом рабочем токе и повышенном напряжении питания — режим λ_{\min} .

Выводы

Из проведенного исследования можно заключить, что критериальный подход является удобным инструментом поиска компромиссных токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента. Полученные с помощью введенных критериев соотношения позволяют определить основные параметры и показатели надежности однокаскадных ТЭУ повышенной надежности для ряда токовых режимов работы, близких к режиму минимальной интенсивности отказов λ_{\min} .

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Huan-Liang Tsai, Phuong Truong Le. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 118. — P. 170—178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.077>
2. Semenyuk V.A., Dekhtiaruk R.I. Increase in CPU power by integrating TEC into the standard heat sink: experimental results // Journal of Thermoelectricity. — 2011. — N 32. — P. 69—78.
3. Anatychuk L., Vikhor L., Rozver Yu. et al. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes // Heat Pipe Science and Technology, An International Journal. — 2011. — Vol. 2, iss. 1-4. — P. 115—120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.120>
4. Анатыхчук Л.И., Вихор Л.Н., Николаенко Ю.Е. и др. Моделирование крупноформатного термоэлектрического модуля охлаждения с тепловыми трубами // Термоэлектричество. — 2010. — № 3. — С. 71—77.
5. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. Applied Thermal Engineering. — 2004. — Vol. 24, iss. 14-15. — P. 2207—2217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001>
6. Li C. et al. Thermoelectric cooling for power electronics circuits: Modeling and applications // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE. — P. 3275—3282.
7. Зайков В. П., Киншова Л. А., Быкадоров В. В., Храмова Л. Ф. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 37—41.
8. Зайков В. П., Киншова Л. А. Комплексный подход при выборе режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 1999. — Вып. 1. — С. 47—49.
9. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Выбор режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства, обеспечивающего минимальную интенсивность отказов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 2. — С. 45—47.
10. Зайков В. П., Ефремов В. И. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства для систем термостабилизации // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 2001. — Вып. 1. — С. 47—50.
11. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.01 2017 г.

КРИТЕРИАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ СТРУМОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ

Розглянуто можливості критеріального підходу до визначення струмового режиму роботи однокаскадного термоелектричного охолоджувального пристрою (ТЕП) при використанні інтенсивності відмов як базового параметра надійності. Отримано співвідношення, що дозволяють визначити струмовий режим роботи ТЕП із заданою геометрією гілок для різних умов експлуатації з урахуванням різних обмежувальних вимог. Проведено порівняльний аналіз струмових режимів, близьких до режимів максимальної енергоефективності та мінімальної інтенсивності відмов, який дозволяє вибрати компромісні варіанти.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувальний пристрій, режим роботи, показники надійності, геометрія гілок термоелементів, електронні компоненти.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.38
UDC 621.362–192

V. P. ZAIKOV, V. I. MESHCHERYAKOV¹,
Yu. I. ZHURAVLYOV²

Ukraine, ¹Odessa State Environmental University,
²National University «Odessa Maritime Academy»
E-mail: gradan@ua.fm

CRITERIAL APPROACH TO FINDING THE CURRENT OPERATION MODES OF HIGH RELIABILITY THERMOELECTRIC DEVICES

The authors consider possibilities of the criterial approach to determining the current operating mode of a single-stage thermoelectric cooling unit (TCU), when used reliability failure rate as a basic parameter. The relations were obtained for determining the current operating mode of a TCU with a given geometry of the branches for different operating conditions, taking into account a variety of restrictive requirements. The paper presents a comparative analysis of current conditions close to the maximum energy efficiency and minimum modes failure rate, which allows choosing compromise options.

Keywords: thermoelectric cooling device operation, reliability, thermocouple branches geometry, electronic components.

REFERENCES

1. Huan-Liang Tsai, Phuong Truong Le. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 118, pp. 170-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.077>
2. Semenyuk V.A., Dekhtiaruk R.I. Increase in CPU power by integrating TEC into the standard heat sink: experimental results. *Journal of Thermoelectricity*, 2011, no. 32, pp. 69-78.
3. Anatychuk L., Vikhor L., Rozver Yu., Rassamakin B., Khairnasov S., Nikolaenko Yu. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2011, vol. 2, iss. 1-4, pp. 115-120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.120>
4. Anatychuk L., Vikhor L., Nikolaenko Yu., Rassamakin B., Rozver Yu. [Simulation of large format thermoelectric cooling module with heat pipes]. *Journal of Thermoelectricity*, 2010, no. 3, pp. 71-77.
5. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, iss. 14-15, pp. 2207-2217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.03.001>
6. Li C. et al. Thermoelectric Cooling for power electronics circuits: Modeling and applications. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, pp. 3275-3282.
7. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Bykadorov V. V., Khranova L. F. [Criterial approach to the selection of the operating mode of the thermoelectric device]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2003, no. 5, pp. 37-41. (Rus)
8. Zaykov V. P., Kinshova L. A. [Integrated approach when choosing modes of operation of the thermoelectric cooling device]. *Teplovye Rezhimy i Okhlazhdenie REA*, 1999, iss. 1, pp. 47-49. (Rus)
9. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F., Efremov V. I., Melnik Yu. V. Choice of mode of operations of the thermoelectrical cooling device, ensuring the minimal failure rate. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2008, no. 2, pp. 45-47. (Rus)
10. Zaykov V. P., Efremov B. I. [Criterial approach to the selection of the operating mode of the thermoelectric device for thermal systems]. *Teplovye Rezhimy i Okhlazhdenie REA*, 2001, iss. 1, pp. 47-50. (Rus)
11. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Reliability indicators prediction for thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage unit]. Odessa, Politehperiodika, 2009, 120 p. (Rus)

Р. С. МЕЛЬНИК, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ,
к. т. н. Е. С. АЛЕКСЕИК

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
E-mail: yunikola@ukr.net, m.roman.kpi@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Определены предельные значения переносимой мощности, обусловленные различными ограничивающими явлениями, применительно к тепловым трубам (ТТ) для систем охлаждения светодиодных модулей осветительных приборов. Показано, что предельное значение переносимой тепловой мощности в тепловых трубах с канавчатой капиллярной структурой, заправленных пентаном и ацетоном, обусловлено фактором уноса теплоносителя, а заправленных изобутаном — кипением в канавках. В тепловых трубах с металловолоконистой капиллярной структурой, заправленных водой, пентаном и ацетоном, определяющим ограничением является капиллярное давление, которое в области высоких значений пористости капиллярной структуры сменяется ограничением по звуковому запираанию парового канала (для ТТ с водой) и ограничением по кипению (для ТТ с пентаном и ацетоном). Все расчеты проводились для температуры насыщения 50°C и при значениях пористости от 30 до 90%.

Ключевые слова: тепловая труба, капиллярная структура, пределы теплопереноса, изобутан, пентан, вода, ацетон, светодиодные модули.

Надежность электронных компонентов, таких как светодиодные и лазерные модули, микропроцессоры, передающие модули и др., в значительной мере зависит от температуры входящих в них миниатюрных полупроводниковых кристаллов. Для современных электронных компонентов проблема обеспечения нормального теплового режима полупроводниковых кристаллов является наиболее острой в связи с увеличением мощности и плотности выделяемого ими теплового потока. Для решения указанной проблемы используются различные системы охлаждения — воздушные, жидкостные, термоэлектрические, комбинированные и т. п. В качестве высокоэффективных теплопередающих устройств в системах охлаждения электронных компонентов все чаще используются тепловые трубы (ТТ), теплопроводность которых на порядки превышает теплопроводность металлов [1, с. 17]. В частности, тепловые трубы используются в системах охлаждения светодиодных модулей [2–4], микропроцессоров [5, 6], лазерных [7, 8] и приемопередающих [9] модулей. Особенности применения различных конструкций тепловых труб в системах охлаждения электронных компонентов изложены, например, в обзорах [10, 11].

Специфика работы тепловых труб, которая заключается в протекании в них замкнутого испарительно-конденсационного цикла переноса теплоты встречными потоками пара и жид-

кости, обуславливает ряд физических ограничений, влияющих на переносимую тепловой трубой мощность [1, с. 12–16; 12, с. 44]. К основным ограничениям относятся:

- капиллярное ограничение, обусловленное тем, что при определенной, предельной, величине теплового потока, подводимого к зоне испарения ТТ, величина движущего перепада давления в капиллярной структуре становится недостаточной для возврата необходимого количества конденсата в зону испарения;

- ограничение по кипению, вызванное тем, что при определенной, критической, величине удельной плотности подводимого теплового потока наступает пленочное кипение теплоносителя, приводящее к быстрому осушению капиллярной структуры и перегреву стенки ТТ;

- ограничение по уносу жидкого теплоносителя встречным потоком пара, обусловленное тем, что при определенной, достаточно высокой, скорости потока пара (при которой число Вебера достигает единицы) происходит затормаживание движения встречного потока жидкости, приводящее к превышению потерь давления над движущим капиллярным напором в капиллярной структуре и, как следствие, к осушению капиллярной структуры в зоне испарения;

- ограничение по скорости потока пара, связанное с тем, что когда скорость потока пара на выходе из испарительной зоны достигает скоро-

сти звука, происходит закипание парового потока.

Показателем влияния каждого из ограничений на работу ТТ является соответствующее предельное значение переносимой мощности, часто называемое в литературе пределом теплопереноса.

При проектировании системы охлаждения на основе ТТ необходимо знать, какое ограничение является определяющим применительно к конкретной ТТ, т. е. выявить то из них, при котором предельное значение переносимого теплового потока минимально.

Целью данного исследования является расчетное определение предельных значений переносимой мощности, обусловленных каждым из основных ограничивающих явлений, применительно к тепловым трубам для систем охлаждения светодиодных модулей осветительных приборов.

Конструкции ТТ, применяемых в системах охлаждения светодиодных осветительных приборов, и выбор объекта исследований

Если для охлаждения микропроцессоров уже разработаны и серийно выпускаются типовые системы охлаждения на основе ТТ с вентиляторами, так называемые кулеры, то для охлаждения большого разнообразия светодиодных модулей (СДМ) и осветительных приборов на их основе пока еще нет типовой конструкции системы охлаждения с ТТ. В настоящее время наиболее распространенным способом охлаждения светодиодных осветительных приборов является оребрение поверхности теплопроводящего основания, противоположной той, на которой установлены светодиодные модули. Такие системы охлаждения нашли широкое применение в светодиодных лампах прямой замены и в уличных светодиодных светильниках. Однако в ряде других осветительных приборов, например в мощных светодиодных люстрах с объемными СДМ, оребренная поверхность необходимой площади не может быть размещена в непосредственной близости к месту расположения СДМ по конструктивным и эстетическим соображениям. В этих случаях наиболее эффективным представляется отвод теплоты от светодиодных модулей с помощью тепловых труб к расположенной на удалении оребренной поверхности необходимых размеров и формы [13–17].

Наиболее распространенными являются прямые конструкции ТТ с канавчатой, резьбовой, порошковой и металловолоконистой капиллярными структурами, и их можно рекомендовать для использования в системах охлаждения све-

тодиодных модулей. В некоторых случаях, например для систем охлаждения подвесных декоративных люстр [13–16], предпочтительней использовать ТТ изогнутой формы, что обусловлено необходимостью придания осветительному прибору более эстетичного вида.

Варианты светодиодных осветительных приборов с использованием прямых ТТ в качестве теплопередающих элементов приведены, например, в [2, 17]. В описанной в [2] конструкции системы охлаждения уличного светильника СДМ установлены в зоне нагрева прямой плоской алюминиевой ТТ длиной 400 мм (на ее продольном ребре шириной 30 мм). Зона охлаждения, расположенная на противоположном конце ТТ, снабжена ребристым радиатором с требуемой площадью поверхности охлаждения. В осветительном приборе [17] для внутреннего освещения производственных помещений используется пять аммиачных алюминиевых ТТ прямой формы длиной 1018 мм с капиллярной структурой в виде продольных Ω -образных канавок. В светодиодных люстрах [13, 16] для освещения жилых помещений применены изогнутые медные ТТ с металловолоконистой капиллярной структурой (зона нагрева ТТ со светодиодным модулем расположена выше зоны транспорта) или алюминиевые и медные ТТ с канавчатой или резьбовой капиллярными структурами (зона нагрева расположена ниже зон транспорта и конденсации). Для охлаждения СДМ небольших размеров можно использовать медные цилиндрические миниатюрные ТТ [18] или плоские керамические ТТ с капиллярными канавками [19].

Теплопередающие характеристики ТТ зависят от вида и параметров капиллярной структуры, теплофизических свойств теплоносителя, температуры и геометрии самой ТТ, значения подводимого теплового потока. Для проведения исследований были выбраны две конструкции ТТ, которые могут быть рекомендованы для использования в системах охлаждения СДМ осветительных приборов: алюминиевая ТТ с капиллярной структурой в виде Ω -образных канавок и медная ТТ с металловолоконистой капиллярной структурой (МВКС). Основные сведения о параметрах ТТ и исходных величинах для расчета их тепловых характеристик приведены в **таблице**, а геометрические размеры капиллярной структуры — на **рис. 1**.

Расчет предельных значений переносимого теплового потока проводился для алюминиевых ТТ, заполненных различными теплоносителями: пентаном, ацетоном и изобутаном для ТТ с канавчатой капиллярной структурой, водой, пентаном и ацетоном для ТТ с МВКС. Диаметр па-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Основные исходные данные для расчета максимальной тепловой мощности, переносимой тепловой трубой

Параметры ТТ	ТТ с канавками	ТТ с МВКС
Материал корпуса	Алюминиевый сплав АД 31	Медь
Длина, мм	830	830
Длина зоны нагрева, мм	50	50
Длина зоны охлаждения, мм	200	200
Теплоноситель	Пентан, ацетон, изобутан	Вода, пентан, ацетон
Внешний диаметр корпуса, мм	12	12
Внутренний диаметр корпуса, мм	7	10
Диаметр парового канала, мм	7	4
Температура насыщения, °С	50	50

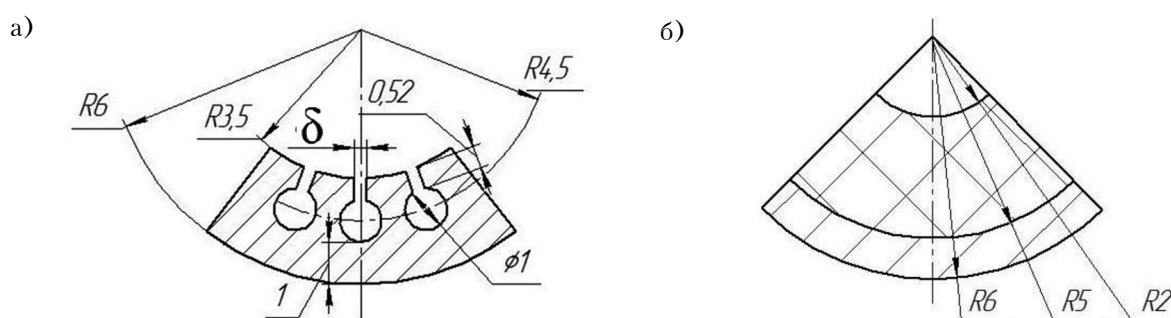


Рис. 1. Фрагменты поперечного сечения канавчатой (а) и металловолоконистой (б) капиллярных структур

рового канала, для которого проводились расчеты, принимался равным 7 мм в первом случае и 4 мм во втором. В качестве определяющей была выбрана температура насыщения, которая принималась равной 50°C.

Предельные значения мощности, переносимой алюминиевой ТТ с капиллярной структурой в виде Ω-образных канавок

Расчет предельных значений переносимой мощности проводился для прямой алюминиевой ТТ с Ω-образными канавками при различных углах ее наклона к горизонту и переменном значении параметра канавок, в качестве которого был выбран их гидравлический радиус. Для выполнения расчетов использовались зависимости, приведенные в [12, с. 64–90].

Предельное значение переносимой мощности, обусловленное капиллярным ограничением, рассчитывается как

$$Q_{\text{кап}} = \frac{(QL)_{\text{max}}}{L_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{эф}}$ — эффективная длина ТТ (м), $L_{\text{эф}} = 0,5L_{\text{е}} + L_{\text{а}} + 0,5L_{\text{с}}$;

$L_{\text{е}}$, $L_{\text{а}}$, $L_{\text{с}}$ — длина зон испарения, транспорта и конденсации соответственно.

Фактор капиллярного ограничения $(QL)_{\text{max}}$ передаваемой мощности вычисляется по формуле

$$(QL)_{\text{max}} = \frac{2\sigma / r_c - \Delta P_{\perp} - \rho_l g L_t \sin \alpha}{F_l + F_v}, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения (Н/м);

r_c — радиус капилляра (м);

ΔP_{\perp} — нормальное гидростатическое давление (Па);

ρ_l — плотность жидкости (кг/м³);

g — ускорение свободного падения (м/с²);

L_t — общая длина тепловой трубы (м);

α — угол наклона тепловой трубы относительно горизонта (рад).

Входящие в знаменатель коэффициенты трения жидкости F_l и пара F_v вычисляются по формулам

$$F_l = \frac{\mu_l}{KA_w \rho_l r};$$

$$F_v = \frac{f_v \text{Re}_v \mu_v}{2r_{h,v}^2 A_w \rho_v r}.$$

где μ_l , μ_v — вязкость жидкости и пара соответственно (Па·с);

K — проницаемость капиллярной структуры (м²);

A_w — площадь поперечного сечения капиллярной структуры (м²);

r — удельная теплота парообразования (Дж/кг);

$f_v Re$ — коэффициент гидростатического сопротивления;
 $r_{h,v}, A_v$ — гидравлический радиус (м) и площадь поперечного сечения (м²) парового канала соответственно;
 ρ_v — плотность пара (кг/м³).

Площадь поперечного сечения парового канала вычисляется по формуле

$$A_v = \frac{2S_{\text{кан}}}{B} = \frac{2(\pi r_{\text{кан}}^2 + \delta h_{\text{кан}})}{2\pi r_{\text{кан}} + 2h_{\text{кан}} - \delta},$$

где $S_{\text{кан}}$ — площадь поперечного сечения канавки (м²);

B — смоченный периметр канавки (принимается, что теплоноситель смачивает весь периметр) (м);

$r_{\text{кан}}$ — радиус круглой части канавки (м);
 $\delta, h_{\text{кан}}$ — ширина и высота прямоугольной части канавки (щели) (м).

Предельное значение переносимой мощности, обусловленное ограничением по кипению, рассчитывается как

$$Q_{\text{кип}} = \frac{2\pi L_e k_e T_v}{r \rho_v \ln(r_k / r_v)} \left(\frac{2\sigma}{r_n} - P \right), \quad (3)$$

где k_e — эффективная теплопроводность насыщенной жидкостью капиллярной структуры (Вт/(м·К));

T_v — температура пара (К);

r_k — внутренний радиус корпуса ТТ (м);

r_v — радиус парового канала (м);

r_n — критический радиус зародыша парового пузыря (м);

P — капиллярное давление (Па).

Предельное значение переносимой мощности, обусловленное ограничением по уносу жидкого теплоносителя встречным потоком пара, рассчитывается как

$$Q_{\text{унос}} = A_v r \sqrt{\frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,s}}}, \quad (4)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения (Н/м);

$r_{h,s}$ — гидравлический радиус поверхностных пор (м).

Предельное значение переносимой мощности, обусловленное достижением скоростью потока пара скорости звука, рассчитывается как

$$Q_{\text{звук}} = A_v \rho_v r \sqrt{\frac{\gamma_v R_v T_0}{2(\gamma_v + 1)}}, \quad (5)$$

где γ_v — показатель адиабаты;

R_v — универсальная газовая постоянная, деленная на молекулярную массу пара (Дж/(кг·К));

T_0 — температура насыщения (К).

На рис. 2 показаны рассчитанные для различных теплоносителей зависимости максимальной переносимой ТТ тепловой мощности от угла

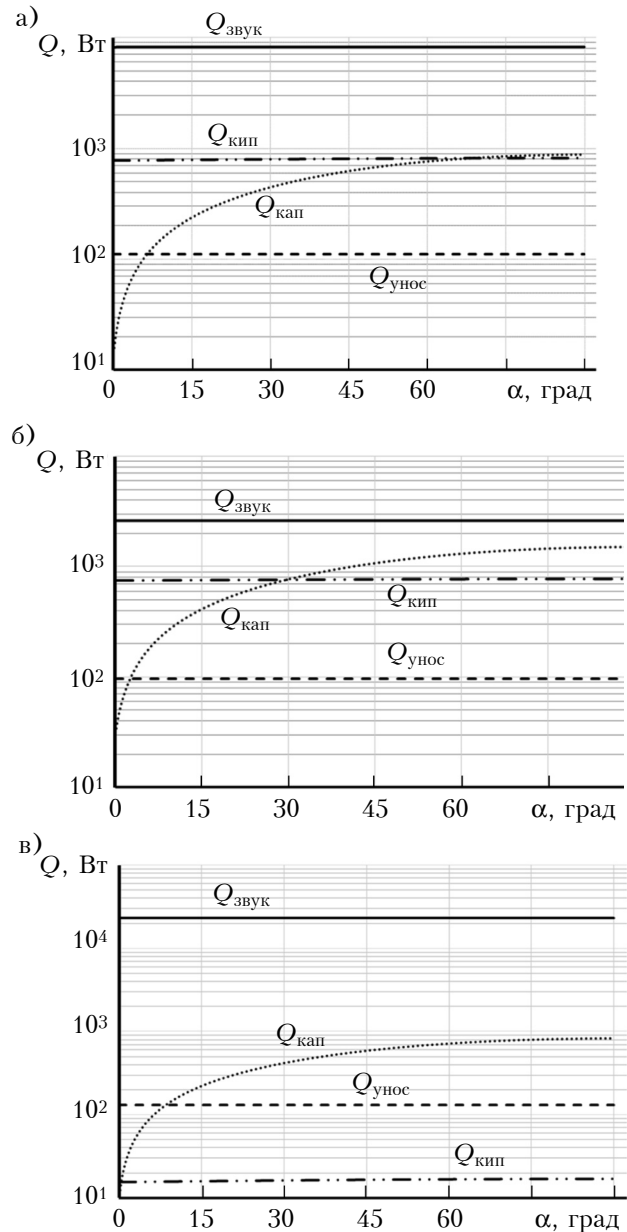


Рис. 2. Зависимости максимальной тепловой мощности $Q_{\text{кап}}$, обусловленной капиллярным ограничением, от угла наклона ТТ к горизонту α в сравнении со значениями, полученными для других ограничений, рассчитанные для различных теплоносителей: а — пентан; б — ацетон; в — изобутан

наклона трубы к горизонту α , соответствующие капиллярному ограничению, а также линии, соответствующие значениям предела теплопереноса по остальным ограничениям — $Q_{\text{звук}}$, $Q_{\text{унос}}$, $Q_{\text{кип}}$, которые, как следует из формул (3)–(5), не зависят от α . Отметим, что в качестве положительного значения угла наклона принимается такое, при котором ТТ функционирует в режиме термосифона, т. е. когда зона подвода тепла расположена ниже зоны теплоотвода.

Как видно из представленных результатов, для алюминиевых ТТ, заправленных пентаном

и ацетоном, наиболее критичным из рассматриваемых факторов является унос теплоносителя встречным потоком пара — в этом случае предельный передаваемый тепловой поток $Q_{\text{унос}}$ наименьший. Для ТТ, заправленных изобутаном, критичным является ограничение теплопередачи по кипению, поскольку наименьшее значение имеет $Q_{\text{кип}}$.

Поскольку одним из определяющих параметров канавчатой капиллярной структуры является гидравлический радиус Ω -образной канавки $r_{h,v}$, были также проведены расчеты предельных значений переносимой мощности в зависи-

мости от $r_{h,v}$. Варьирование значения гидравлического радиуса канавки осуществлялось путем изменения значения ширины щели канавки δ при неизменных значениях ее высоты и радиуса ($h_{\text{кан}} = 0,52$ мм, $r_{\text{кан}} = 0,5$ мм). Расчет проводился для горизонтального положения ТТ в пространстве.

Как видно из представленных на рис. 3 графиков, влияние гидравлического радиуса канавки на максимальную тепловую мощность незначительно для всех рассмотренных случаев, за исключением $Q_{\text{кап}}$ в области значений $r_{h,v}$ примерно до 0,43 мм. При увеличении $r_{h,v}$, а значит и δ , эта зависимость также ослабевает, поскольку чем больше ширина щели канавки, тем меньше степень ее влияния на движущий перепад давления в капиллярной структуре и, соответственно, на капиллярное ограничение.

Из анализа полученных графиков видно, что для заправленных ацетоном ТТ в области значений гидравлического радиуса до 0,4 мм определяющим является ограничение, связанное с уносом жидкого теплоносителя встречным потоком пара. При дальнейшем увеличении $r_{h,v}$ определяющим становится, как и для заправленных пентаном ТТ, капиллярное ограничение, обусловленное транспортной способностью капиллярной структуры. Для ТТ, заправленных изобутаном, при значении гидравлического радиуса меньше 0,4 мм определяющим является ограничение по кипению теплоносителя, а свыше 0,4 мм — капиллярное ограничение. Это можно объяснить тем, что при увеличении ширины щели канавки уменьшается капиллярная сила, вследствие чего уменьшается и способность канавчатой капиллярной структуры обеспечить возврат конденсата в зону испарения.

Предельные значения мощности, переносимой ТТ с металловолоконистой капиллярной структурой

Расчет проводился для ТТ, заправленных водой, пентаном и ацетоном, при их горизонтальной ориентации в пространстве. Такой выбор теплоносителей обоснован температурным диапазоном работы ТТ в системах охлаждения светодиодных модулей и коррозионной совместимостью теплоносителя с материалом корпуса и капиллярной структуры ТТ. Следует отметить, что в данном случае фактор уноса теплоносителя встречным потоком пара не рассматривался ввиду особенностей металловолоконистой структуры. В отличие от алюминиевых ТТ с канавками, МВКС обладает большим гидравлическим сопротивлением, поскольку основная масса жидкого теплоносителя находится в теле капиллярной структуры. При движении потока пара вдоль ее поверхности его скорость снижается, делая невозможным унос теплоносителя и осушение капиллярной структуры.

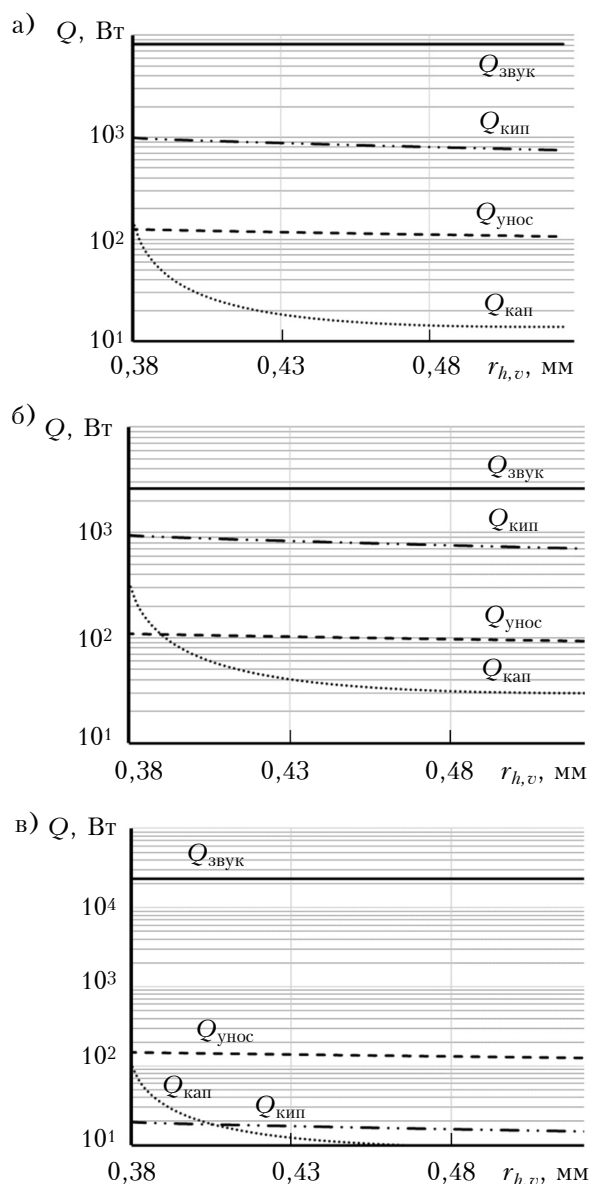


Рис. 3. Зависимости максимальной тепловой мощности, обусловленной различными физическими ограничениями, от гидравлического радиуса ТТ при ее горизонтальном расположении, рассчитанные для различных теплоносителей:

а — пентан; б — ацетон; в — изобутан

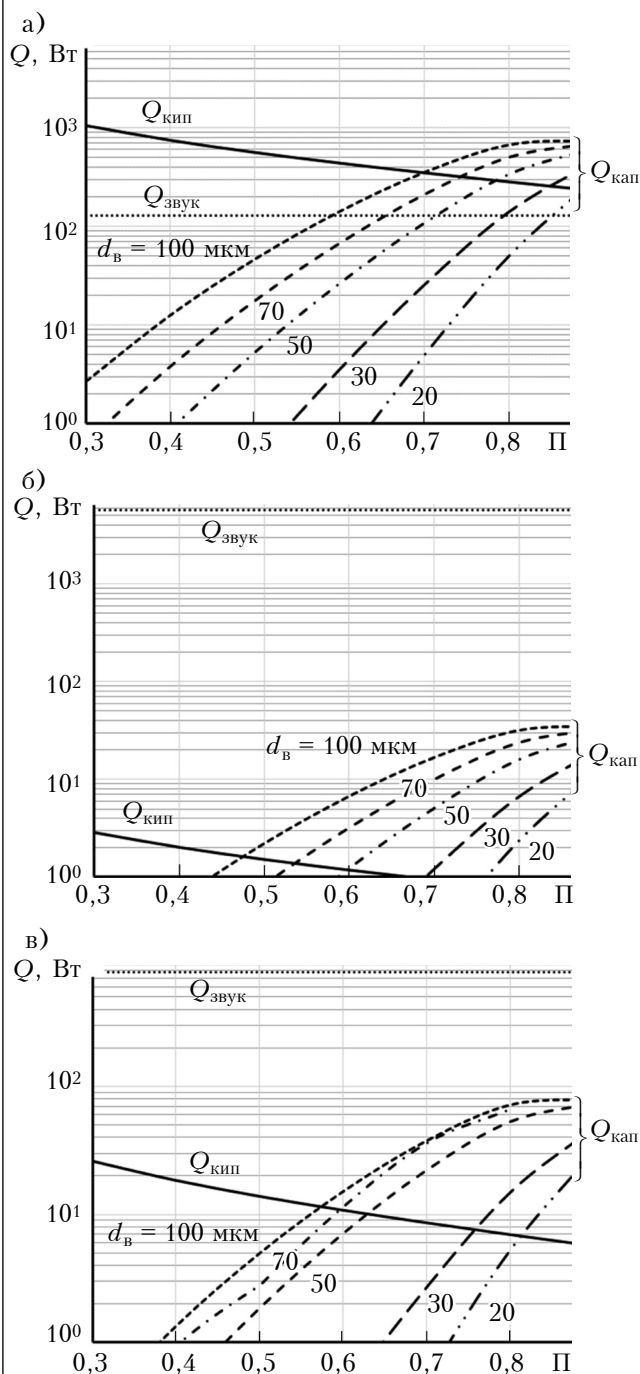


Рис. 4. Зависимость максимальной тепловой мощности, переносимой ТТ с МВКС, заправленной водой (а), пентаном (б) и ацетоном (в), от пористости P для ограничения по скорости парового потока ($Q_{звук}$), ограничения по кипению в МВКС ($Q_{кип}$), а также для капиллярного ограничения ($Q_{кап}$) при различных значениях диаметра волокон d_v

В качестве переменных параметров капиллярной структуры выступали пористость P и диаметр волокон d_v . Значение P изменялось от 30 до 86%, d_v — от 20 до 100 мкм.

Как видно из рис. 4, а, основное влияние на теплопередающую способность ТТ с МВКС, заправленных водой, оказывает капиллярное огра-

ничение, а в области высоких значений пористости структуры (выше 58%) — ограничение по звуковому запираанию парового потока.

Полученные результаты расчета ограничений теплопереноса в ТТ с пентаном в качестве теплоносителя свидетельствуют о том, что основным ограничением передаваемой мощности тепловой трубой с заданными параметрами волокон МВКС является капиллярное ограничение (см. рис. 4, б).

Для ТТ, заправленных ацетоном, как и для ТТ с водой, имеет место пересечение предельных значений переносимой мощности (см. рис. 4, в). Основным влияющим на переносимый тепловой поток ограничением является капиллярное ограничение с переходом в области высоких значений пористости к ограничению по кипению.

Выводы

Проведенные исследования показали, что при одинаковых прочих условиях значения предельной мощности, полученные при различных физических ограничениях, могут отличаться между собой на один-два порядка. При заданной температуре насыщения в ТТ влияние на то, какой из ограничительных факторов будет определяющим для выбора значения предельной мощности, оказывают в основном тип капиллярной структуры, ее геометрические параметры и вид теплоносителя.

Таким образом, при проектировании системы охлаждения на основе ТТ предельную мощность, переносимую конкретной тепловой трубой, необходимо определять с учетом таких физических ограничений, как предельная скорость парового потока, ограничение по кипению, по уносу жидкого теплоносителя встречным потоком пара и капиллярное.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. — Москва: Атомиздат, 1978.
2. Гвоздев С.М., Митрофанов А.В., Сафонов С.А., Холодильников В.И. Об использовании тепловых труб в проектировании мощных светильников со светодиодами // Светотехника. — 2012. — № 2. — С. 19–21.
3. Hongyu Tang, Jia Zhaoi, Bo Li et al. Thermal performance of embedded heat pipe in high power density LED streetlight module // IEEE 2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2014. — Ghent, Belgium. — 2014. — P. 1/6–6/6. — <http://dx.doi.org/10.1109/EuroSimE.2014.6813883>
4. Сапрыкин С., Смирнов В., Абалов А. Опыт, сын ошибок трудных, или зачем нужны инженеры при создании светильника? Часть 1. Избыточное тепло и как с ним бороться // CHIP News Украина. Инженерная микроэлектроника. — 2016. — № 6. — P. 31–36.

5. Николаенко Ю.Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 2. — Р. 29–36. — <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/16362>
6. Mohamed H. A. Elnaggar, Mohd. Zulkifly Abdullah, Sri Raj Rajeswari Munusamy. Experimental and numerical studies of finned L-shape heat pipe for notebook-PC cooling // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. — Vol. 3, N 6. — 2013. — Р. 978–988. — <http://dx.doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2245944>
7. Васильев Л. Л. мл., Гракович Л. П., Драгун Л. А. и др. Система охлаждения электронных компонентов // Инженерно-физический журнал. — 2017. — Т. 90, № 1. — С. 101–107.
8. Мерзвинский П.А., Осинский В.И., Николаенко Ю.Е., Жук С.К. Энергетические потоки в гетеролазерах и проблемы теплоотвода // Оптико-электронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 1. — С. 121–124. — <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18017>
9. Глазунова Л. В. Система термостабилизации в приемопередающей аппаратуре // Инженерный вестник Дона. — 2010. — Т. 20, № 2. — С. 115–119. — http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_2_17.pdf
10. Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Koichi Mashiko et al. A review of heat pipe application including new opportunities // Frontiers in Heat Pipes. — 2011. — Vol. 2, 013001. — Р. 1–15. — <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
11. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems // Frontiers in Heat Pipes. — 2015. — Vol. 6, iss. 6. — Р. 1–14. — <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v6.6>
12. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / Пер. с англ. В.Я. Сидорова. — Москва: Машиностроение, 1981.
13. Nikolaenko T.Yu., Nikolaenko Yu.E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with light

- emitting diodes // Light & Engineering. — 2015. — Vol. 23, N 3. — Р. 85–88. — <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84966507707&partnerID=MN8TOARS>
14. Пат. 81688 України. Світлодіодний освітлюваний пристрій / Ю.Є. Ніколаєнко, Б.М. Рассамакін, С.М. Хайрнасов. — 2013. — Бюл. № 13.
15. Николаенко Ю.Е., Быков Е.В., Лозовой М.А. и др. Пути снижения температуры кристалла светодиода в составе люстры с алюминиевыми тепловыми трубами // Труды XV МНПК «Современные информационные и электронные технологии», т. II. — Украина, г. Одеса. — 2014. — С. 24–25. — <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17475>
16. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules // 2016 International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16). Conference Proceeding. — Ukraine, Odessa. — 2016. — Р. 1–4. — <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
17. Лозовой М.А., Николаенко Ю.Е., Рассамакін Б.М., Хайрнасов С.М. Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 5–6. — С. 32–38. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>
18. Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Nekrashevich Ya.V. Experimental studies of heat-transfer characteristics of miniaturized heat pipes // Heat Transfer Research. — 2007. — Vol. 38, N 6. — Р. 553–563. — <http://dx.doi.org/10.1615/HeatTransRes.v38.i6.70>
19. Nikolaenko Yu. E., Rotner S. M. Using laser radiation for the formation of capillary structure in flat ceramic heat pipes // Technical Physics Letters. — 2012. — Vol. 38, iss. 12. — Р. 1056–1058. — <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785012120085>

*Дата поступления рукописи
в редакцию 06.04 2017 г.*

Р. С. МЕЛЬНИК, Ю. Є. НІКОЛАЄНКО, В. Ю. КРАВЕЦЬ, Є. С. АЛЕКСЕЇК

Україна, м. Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського
E-mail: yunikola@ukr.net, m.roman.kpi@gmail.com

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ОБМЕЖУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ГРАНИЦІ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ З РІЗНИМИ ТЕПЛОНОСІЯМИ

Визначено граничні значення теплової потужності, що переноситься тепловими трубами (ТТ) для систем охолодження світлодіодних модулів освітлювальних приладів, які зумовлені різними обмежувальними явищами. Показано, що ці граничні значення для теплових труб з канавчатою капілярною структурою, заправлених пентаном і ацетоном, обумовлені фактором винесення теплоносія, а заправлених ізобутаном — кипінням в канавках. У теплових трубах з металоволокнистою капілярною структурою, заправлених водою, пентаном і ацетоном, визначальним обмеженням є капілярний тиск, який в області високих значень пористості капілярної структури змінюється обмеженням по звуковому запиранню парового каналу (для ТТ з водою) і обмеженням по кипінню (для ТТ з пентаном і ацетоном). Всі розрахунки проводилися для температури насичення 50° С і при значеннях пористості від 30 до 90%.

Ключові слова: тепла труба, капілярна структура, границі теплоперенесення, ізобутан, пентан, вода, ацетон, світлодіодний модуль.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.47
UDC 536.248.2; 628.941.8

**R. S. MELNYK, Yu. E. NIKOLAENKO,
V. Yu. KRAVETS, Ye. S. ALEKSEIK**

Ukraine, Kyiv, KPI them.Igor Sikorsky
E-mail: yunikola@ukr.net, m.roman.kpi@gmail.com

THE INFLUENCE OF THE KEY LIMITING FACTORS ON THE LIMITATIONS OF HEAT TRANSFER IN HEAT PIPES WITH VARIOUS WORKING FLUIDS

Aluminium and copper heat pipes with grooved and metal fibrous capillary structure are high effective heat transfer devices. They are used in different cooling systems of electronic equipment like a LED modules,

microprocessors, receive-transmit modules and so on. However thus heat pipes have heat transfer limitations. There are few types of this limitations: hydraulic limitation, boiling limitation, liquid entrainment by vapor flow and sonic limitation. There is necessity to know which one of these limitations is determinant for heat pipe due to design process. At a present article calculations of maximum heat transfer ability represented. All these calculations were made for LED cooling by using heat pipes with grooved and metal fibrous capillary structures. Pentane, acetone, isobutane and water were used as a coolants. It was shown that the main operation limit for axial grooved heat pipe, which determinate maximum heat transfer ability due to inclination angle for location of cooling zone higher than evaporation zone case, is entrainment limit for pentane and acetone coolants. Nevertheless, for isobutane coolant the main limitation is a boiling limit. However, for heat pipes with metal fibrous capillary structure the main limitation is a capillary limit. This limitation was a determinant for all calculated coolants: water, pentane and acetone. For high porosity range of capillary structure, capillary limit transfer to sonic limit for heat pipes with water, that means that the vapor velocity increases to sonic velocity and can't grow any more. Due to this, coolant cant in a needed quantity infill condensation zone and the last one drained. For heat pipes with acetone and pentane, capillary limit transfer to boiling limit. All calculations were made for vapor temperature equal to 50°C, and for porosity range from 30% to 90%.

Keywords: LED module, heat pipe, capillary structure, operation limits, isobutan, pentane, water, acetone.

REFERENCES

1. Ivanovskiy M.N., Sorokyn V.P., Iagodkin I.V. Fizicheskie osnovy teplovykh trub [Physical fundamentals of heat pipes]. Moscow, Atomizdat, 1978, 256 p. (Rus)
2. Gvozdev S. M., Mitrofanov A. V., Safonov S. A., Kholodilov V. I. [On the application of heat pipes in designing powerful lightning devices with LEDs]. *Svetotekhnika*, 2012, no 2, pp. 19-21 (Rus)
3. Hongyu Tang, Jia Zhaoi, Bo Li, Stanley Y Y Leungi, Cadmus C A Yuan, and G Q Zhang. Thermal Performance of Embedded Heat Pipe in High Power Density LED Streetlight Module. *IEEE 2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2014*, Ghent, Belgium, pp. 1/6-6/6. <http://dx.doi.org/10.1109/EuroSimE.2014.6813883>
4. Saprykin S., Smyrnov V., Abalov A. [Experience, son of difficult mistakes or why engineers needed due to creation of a lamp? Part 1, Redundant heat and how to struggle with it]. CHIP News Ukraine. *Engineering microelectronics*. 2016, no. 6, pp. 31-36 (Rus).
5. Nikolaenko Yu.E. [Schematics of the architecture of heat rejection from functional modules of a computer with the help of two-phase heat-transfer devices]. *Upravlyayushchie Sistemy i Mashiny*. 2005, no. 2, pp. 29-36 (Rus). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/16362>
6. Mohamed H. A. Elnaggar, Mohd. Zulkifly Abdullah, and Sri Raj Rajeswari Munusamy. Experimental and numerical studies of finned L-shape heat pipe for notebook-PC cooling. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. June 2013, vol. 3, no. 6, pp. 978-988. <http://dx.doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2245944>
7. Vasil'ev L. L. Jr., Grakovich L. P., Dragun L. A., Zhuravlev A. S., Olekhovich V. A., Rabetskii M. I. System for Cooling of Electronic Components. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, January 2017, vol. 90, iss. 1, pp. 95-101. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-017-1543-8>
8. Merzhvinskiy P.A., Osynskiy V.I., Nikolaenko Yu.E., Zhuk S.K. [Energetic fluxes in geterolasers and problems of heat sink]. *Optyko-elektronny informatsiyno-energetichnyy tekhnologii*. 2002, no. 1, pp. 121-124 (Rus). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18017>
9. Glazunova L.V. [Thermal stabilization system in receive-transmitting outfit]. *Ingenerniy vesnyk Dona*. 2010, vol. 20, no. 2, pp. 115-119 (Rus). http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_2_17.pdf_759.pdf
10. Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Koichi Mashiko, Yuji Saito, Tien Nguyen, Vijit Wuttijumnong. A review of heat pipe application including new opportunities. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. 2011, vol. 2, 013001, pp. 1-15. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
11. Khairnasov S., Naumova A. Heat Pipes Application in Electronics Thermal Control Systems. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*. 2015, vol. 6, iss. 6, pp. 1-14. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>
12. Chi S. Teplovyte trubyy: Teoriya i praktika [Heat pipes: Theory and practice]. Moscow, Mashynostroenie, 1981, 207 p. (Rus)
13. Nikolaenko T.Yu., Nikolaenko Yu.E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. *Light & Engineering*. 2015, vol. 23, no. 3, pp. 85-88. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84966507707&partnerID=MN8TOARS>
14. Pat. 81688 Ukraine. [LED lighting unit]. Yu. E. Nikolaenko, B. M., Rassamakin, S. M. Khairnasov. 2014, byul. no 13 (Ukr).
15. Nikolaenko Yu. E., Bykov E. V., Lozoviy M. A., Khairnasov. S. M., Khmelev Yu. A. [The ways of Reducing the Temperature of LED Chip as part of Chandeliers with aluminum heat pipe]. *Proc. of 15th International scientific-practical conf. "Modern information and electronic technologies"*, Vol. II. Ukraine, Odessa, 2014, pp. 24-25 (Rus). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17475>
16. Kozak D. V., Nikolaenko Yu. E. The working characteristics of two-phase heat transfer devices for LED modules. *2016 IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16)*. Conference Proceeding. Ukraine, Odessa, 2016, pp. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500980>
17. Lozoviy M. A., Nikolaenko Yu. E., Rassamakin B. M., Khairnasov. S. M. [Research on thermal characteristics of heat pipes for LED lightening devices]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no 5-6, pp. 32-38 (Rus). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>
18. Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E., Nekrashevich Ya.V. Experimental studies of heat-transfer characteristics of miniaturized heat pipes. *Heat Transfer Research*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 553-563. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatTransRes.v38.i6.70>
19. Nikolaenko Yu. E., Rotner S. M. Using laser radiation for the formation of capillary structure in flat ceramic heat pipes. *Technical Physics Letters*, 2012, vol. 38, iss. 12, pp. 1056-1058. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785012120085>

А. П. ЩЕРБАНЬ, д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН, Ю. В. ГОРБЕНКО, Д. А. СОЛОПИХИН,
В. Д. ВИРИЧ, Л. А. ПИРОЖЕНКО

Украина, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: shcherban@kipt.kharkov.ua

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ: КАДМИЯ, ЦИНКА, СВИНЦА

Предложены комплексные процессы глубокого рафинирования кадмия, цинка и свинца дистилляцией в вакууме. Разработано устройство для получения гранул. Исследован процесс гранулирования высокочистых металлов. Чистота получаемых гранул кадмия и цинка выше 99,9999, а гранул свинца — выше 99,9995 мас. %.

Ключевые слова: высокочистые металлы, кадмий, цинк, свинец, рафинирование, дистилляция в вакууме, гранулирование, пассивация поверхности.

Кадмий, цинк, свинец являются составными компонентами многих полупроводниковых соединений, таких как CdTe , $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, CdSb , ZnTe , ZnSe и др., и сцинтилляционных кристаллов вольфраматов и молибдатов этих металлов, таких как $(\text{Cd}, \text{Zn}, \text{Pb})\text{WO}_4$ и $(\text{Cd}, \text{Zn}, \text{Pb})\text{MoO}_4$, используемых в качестве детекторов ионизирующих излучений, детекторов регистрации безнейтринного двойного β -распада и частиц темной материи. Достижение высоких детектирующих, спектрометрических и оптических параметров таких детекторов является весьма проблематичным без использования высокочистых исходных материалов.

Одним из способов глубокой очистки выше перечисленных элементов является дистилляция в вакууме. В ННЦ ХФТИ в последние годы разработаны усовершенствованные дистилляционные методы глубокого рафинирования кадмия, цинка и свинца [1–5]. При этом высокочистые дистилляты металлов получают в виде крупноразмерных элементов или слитков, зачастую неудобных для использования и требующих измельчения, в процессе которого не всегда удается сохранить исходную чистоту материала. Для выращивания полупроводниковых и сцинтилляционных монокристаллов подходящими для дальнейшего использования являются «сыпучие» гранулированные высокочистые дистилляты, которыми можно оперировать без опасности внесения загрязнения. Например, для Европейского низкофонового эксперимента LUCIFER потребовалось более 20 кг высокочистого гранулированного цинка [6], предложение на поставку которого было принято от ННЦ ХФТИ. Затем эта задача была расширена на кадмий и свинец.

Целью данной работы является разработка и исследование процессов получения высокочистых гранулированных цинка, кадмия и свинца.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили слитки дистиллятов Cd и Zn чистотой выше 99,9999, а Pb — выше 99,9996 мас. %, полученные комплексным дистилляционным методом глубокого рафинирования в вакууме, и гранулы металлов, полученные на специально разработанном устройстве.

В работе использовали химические методы пассивации поверхности гранул. Контроль состояния их поверхности проводили с помощью микроскопов МБС-9 и MTU253. Анализ содержания примесей в образцах кадмия, цинка и свинца проводили с помощью лазерного масс-спектрометра высокого разрешения с двойной фокусировкой типа Маттауха — Герцога MS 3101 с регистрацией на фотопленку. Для измерения оптической плотности спектральных линий использовали регистрирующий микрофотометр ИФО-451. Случайная погрешность результатов анализа характеризуется величиной относительного стандартного отклонения 0,15–0,30.

Экспериментальная часть

Глубокое рафинирование Cd и Zn дистилляцией в вакууме с применением геттерного фильтра

Дистилляцию Cd и Zn осуществляли с помощью устройства квазизамкнутого типа, принципиальная схема которого приведена на **рис. 1**. Детали устройства, находившиеся в контакте с металлом, изготавливали из высокочистого графита марки МПГ-7. Устройство устанавливали

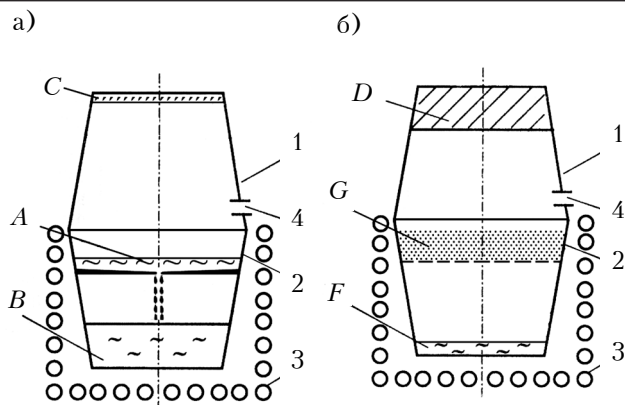


Рис. 1. Схема дистилляционного устройства на этапе отгонки легколетучих примесей путем прогрева и фильтрации (а) и на этапе очистки от труднолетучих примесей путем перегонки металла через геттерный фильтр (б):

1 — конденсатор, 2 — тигель, 3 — нагреватель, 4 — отверстие; А — исходный металл; В — отфильтрованный металл; С — тонкий слой конденсата с легколетучими примесями; D — дистиллят; F — остаток в тигле с труднолетучими примесями; G — геттерный фильтр

в вакуумную камеру, во время процесса в ней создавали давление 10^{-4} – 10^{-2} Па. Загрузка металла составляла 1,5–2,5 кг.

Устройство собрано из двух одинаковых деталей, нижняя из которых выполняет роль тигля (2), а верхняя (1) служит сборником конденсированного металла (D). Небольшое боковое отверстие 4 в стенке тигля предназначено для вакуумирования и удаления легколетучих примесей.

Дистилляцию кадмия и цинка проводили в следующих температурных условиях: температура испарения $T_{\text{исп}} = T_{\text{пл}} + (50...60)$ К, температура конденсации $T_{\text{конд}} = T_{\text{пл}} - (30...40)$ К, где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления.

Рафинирование выполняли в два этапа. На первом этапе проводили фильтрацию и отгонку легколетучих примесей (Na, K, S, P, Cl и др.)



Cd (430 г)



Zn (350 г)

Рис. 2. Фотографии полученных слитков высокочистых дистиллятов кадмия и цинка

с конденсацией их на поверхности конденсатора. После удаления конденсата (примерно 5% от исходной загрузки металла) с легколетучими примесями наступал второй этап процесса — удаление труднолетучих примесей (Fe, Ni, Si, Al, Cu и др.), которые оставались на дне тигля. На этом этапе металл подвергался однократной перегонке через геттерный фильтр из сплава Zr–Fe с долей перегонки 90...95%. Основное предназначение геттерного фильтра — очистка от примесей внедрения (C, N, O), содержание которых снижается примерно на порядок по сравнению с дистилляцией без фильтра [7, 8]. При этом происходит также дополнительная (в 2–5 раз) очистка от основных металлических примесей.

Получаемые таким образом дистилляты Cd и Zn сплавляли в слитки необходимых для процессов гранулирования размеров (рис. 2).

Глубокое рафинирование Pb с конденсацией в жидкую фазу

Особенностью свинца является низкая упругость его пара при температуре плавления ($4,3 \cdot 10^{-7}$ Па) [9, с. 385]. Расчеты показали, что приемлемые значения упругости пара при дистилляции свинца создаются при температуре расплава 1200–1240 К. Для глубокого рафинирования свинца было разработано специальное устройство с конденсацией пара Pb в жидкую фазу (рис. 3). Устройство изготавливали из высокочистого плотного графита марки МПГ-7 с минимальным содержанием примесей, обладающего химической инертностью по отношению к свинцу.

При испарении из тигля до 95% исходного (после фильтрации) свинца происходит его очистка от труднолетучих примесей, которые остаются в тигле. Вместе с основным металлом в нагретый конденсатор поступают и легколетучие примеси. Поскольку конденсатор с металлом в процессе рафинирования находится при повы-

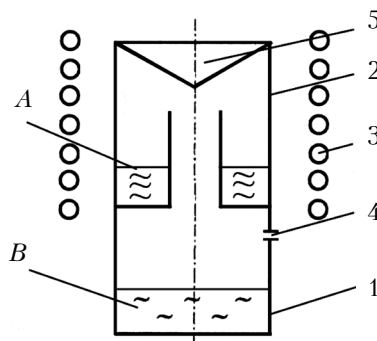


Рис. 3. Схема дистилляционного устройства для рафинирования свинца:

1 — конденсатор, 2 — тигель, 3 — нагреватель, 4 — отверстие, 5 — отражатель пара; А — исходный металл; В — рафинированный металл

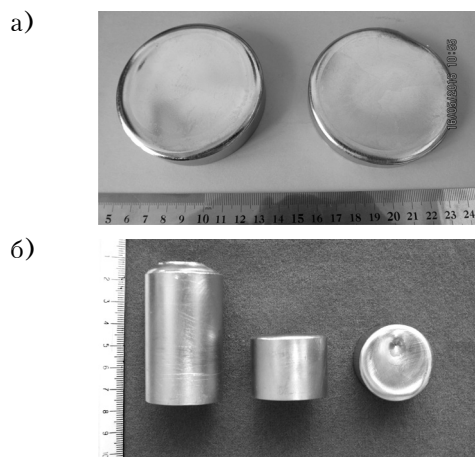


Рис. 4. Фото слитков дистиллятов рафинированного свинца:

a — полученные после дистилляции (≈ 1 кг каждый);
б — сформированные в соответствии с заданными размерами (общий вес ≈ 1 кг)

шенной температуре ($T_{\text{конд}} = 0,8 T_{\text{исп}}$), легколетучие примеси испаряются и удаляются через специальные отверстия [5]. Таким образом, в предложенной схеме рафинирования одновременно происходит очистка от трудно- и легколетучих примесей, что значительно повышает производительность процесса и выход годной продукции.

На **рис. 4** приведены фотографии слитков рафинированного свинца, полученных после дистилляции, и сформированных слитков заданных размеров.

Устройство и процесс гранулирования высокочистых кадмия, цинка и свинца

Для получения гранулированных высокочистых Cd, Zn и Pb было разработано специальное устройство (**рис. 5**).

Верхний контейнер имеет форму цилиндра и изготовлен из высокочистого плотного графита марки МПГ7 и предназначен для загрузки в

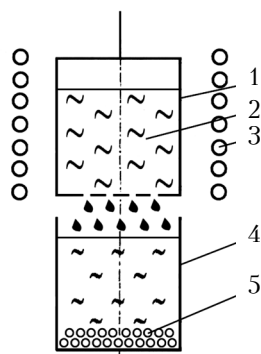


Рис. 5. Схема устройства для гранулирования кадмия, свинца и цинка:

1 — верхний контейнер с отверстиями; 2 — расплавленный металл; 3 — нагреватель; 4 — контейнер с охлаждающей жидкостью; 5 — гранулированный металл

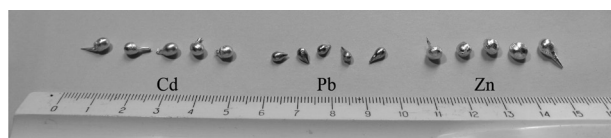


Рис. 6. Образцы полученных гранул металлов

него слитков исходного металла. Перед использованием контейнер прогревается в вакууме при температуре примерно 1000°C в течение одного часа для удаления поверхностных загрязнений.

В дне верхнего контейнера выполнены отверстия, через которые расплавленный металл капает в контейнер с охлаждающей жидкостью (бидистиллированной водой), выполненный из высокочистого кварца. После слива жидкости гранулы металла высушивают на поглощающих влагу обеззоленных фильтрах.

Поскольку форма капель зависит от отношения длины отверстий l к их диаметру d , опытным путем установлено, что каплеобразные гранулы формируются при $l/d = 3-4$.

Внутренний размер верхнего контейнера (диаметр 40 мм, высота 150 мм) позволяет разместить два цилиндрических слитка высотой по 60 мм (**рис. 2, 4**). В таком устройстве за один цикл можно получить 860 г кадмия, 700 г цинка или 1120 г свинца.

Образцы гранул кадмия, свинца и цинка после гранулирования показаны на **рис. 6**.

Результаты исследования и их обсуждение

В **табл. 1** приведены данные о содержании основных металлических примесей в дистиллятах Cd и Zn, полученных при обычной дистилляции и при дистилляции через геттерный фильтр из сплава Zr—Fe.

Анализ приведенных в **табл. 1** данных показывает, что после сплавления дистиллятов кадмия и цинка в слитки их чистота остается на прежнем уровне, при гранулировании высокочистых Cd и Zn чистота остается на уровне 6N. Таким образом, разработанный процесс позволяет получать гранулированный кадмий и цинк чистотой 99,9999 мас. %.

Основными примесями в свинце являются Cu, Sb и Ag. Как видно из **табл. 2**, после рафинирования их концентрация снижается в 10—500 раз. Содержание других примесей в очищенном свинце находится ниже предела чувствительности методов анализа: Rb, Y, Zr, Nb, Ru, Pt, Au — менее $1 \cdot 10^{-6}$ мас. %; Sc, In, Te — менее $1 \cdot 10^{-5}$ мас. %; Se, Pd — менее $1 \cdot 10^{-4}$ мас. %. Данные получены на примере археологического свинца [3].

Приведенные результаты показывают, что разработанный процесс позволяет получать высокочистый гранулированный свинец чистотой

Таблица 1

Содержание металлических примесей в исходных кадмии и цинке, в слитках после дистилляции без геттера, с применением геттерного фильтра из сплава Zr–Fe и в гранулах

Примесь	Содержание примеси в металле, 10 ⁻⁵ мас. %, не более:							
	Cd				Zn			
	исходный металл марки Кд0А	слитки после дистилляции		гранулы	исходный металл марки ЦВ00	слитки после дистилляции		гранулы
		без геттера	с геттером			без геттера	с геттером	
Fe	20	< 0,2	< 0,2	1	3	< 0,09	< 0,09	1
Cu	420	6	< 0,2	1	0,6	< 0,1	< 0,1	1
Ni	200	< 0,2	< 0,2	1	4	< 0,3	< 0,3	1
Pb	440	4	2	2	1	0,8	0,6	0,6
As	60	< 0,5	< 0,5	< 0,5	10	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sb	100	2	1	1	2	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sn	120	3	< 0,1	< 0,1	1	< 0,6	< 0,6	1
Al	—	—	—	—	0,2	< 0,03	< 0,03	< 0,1
Cd	Основной металл				130	14	2,6	3,0
Zn	20	1	< 0,2	1	Основной металл			
Чистота металла, масс. %, не менее	99,98	99,9998	99,99994	99,9999	99,998	99,9998	99,99995	99,9999

Таблица 2

Содержание основных примесей в исходном свинце, в слитках после дистилляции и в гранулах

Примесь	Содержание примеси в свинце, 10 ⁻⁵ мас. %, не более:		
	исходный металл	слитки после дистилляции	гранулы
Mg	< 1	< 0,4	< 0,4
Al	< 1	0,4	0,7
Si	< 25	0,4	0,6
K	< 10	0,3	0,5
Ca	< 5	0,3	0,4
Fe	< 10	0,2	0,4
Cu	200	0,4	0,8
Ag	80	< 0,6	< 0,6
Sb	230	< 0,6	< 0,6
Суммарное содержание	< 562	< 3,6	< 5
Чистота Pb, масс. %, не менее	99,94	99,9996	99,9995

не менее 99,9995 мас. % при чистоте исходного материала не менее 99,94 мас. %.

После гранулирования в дистиллированной воде гранулы кадмия, свинца и в меньшей мере цинка в процессе хранения на воздухе окисляются: свинец — в течение нескольких часов, кадмий — в течение нескольких суток (**рис. 7**); цинк — после нескольких месяцев. В связи с

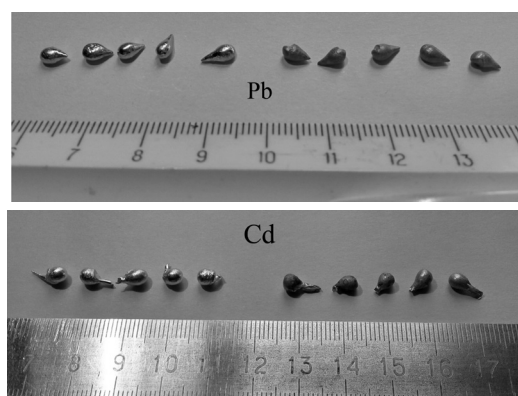


Рис. 7. Образцы гранул свинца и кадмия непосредственно после получения и после выдержки их на воздухе

этим были проведены исследования процессов пассивации поверхности гранул Zn, Cd и Pb химическим методом. Разработаны новые составы травителей и предложена послеоперационная обработка гранул в безводных органических растворах на основе диметилформамида (ДМФА). Такая процедура химической обработки обеспечивает одновременное полирование и пассивацию высокочистых гранулированных Zn, Cd и Pb в виде тонких, эластичных защитных слоев оксидов, устойчивых к атмосферной коррозии в течение длительного времени. Подробное описание процессов пассивации будет опубликовано в отдельной работе.

Использование безводных органических растворов в схемах химической обработки иссле-

дуемых металлов позволяет исключить гидролиз защитных пленок. Применение чистых по катионному и анионному составу органических растворителей в качестве промывной жидкости предотвращает хемосорбцию ионов, присутствующих в традиционно применяемой дистиллированной воде. Это обеспечивает исходную чистоту гранулированных металлов.

Разработанный метод химический пассивации позволяет достаточно длительно хранить гранулы металлов в обычных атмосферных условиях без изменения состояния их поверхности: Zn и Cd — более 60 суток, Pb — до 30.

После успешного применения апротонного растворителя ДМФА в процессах химической пассивации высокочистых гранул Cd, Zn и Pb возникла идея применить его в качестве охлаждающей жидкости в процессах гранулирования этих металлов. Так, для самопассивации поверхности гранул свинца был предложен и опробован раствор глицерин-диметилформамида, а для цинка и кадмия — чистый ДМФА (C_3H_7OH). Использование безводных органических растворов в процессе получения гранул Pb, Zn и Cd позволило исключить специальную химическую пассивацию их поверхности. Качество поверхности полученных таким образом гранул сохраняется в два раза дольше, чем при химической пассивации.

Выводы

Таким образом, разработанные процессы глубокой очистки металлов от легко- и трудноту- чих примесей позволили получить на специально сконструированном устройстве высокочистые гранулы цинка, кадмия и свинца: Zn и Cd чистотой не менее 9,99995 мас. %, Pb — 99,9996 мас. %. Предложенный метод пассивации гранулирован-

ных металлов обеспечивает длительный срок их хранения на воздухе без окисления поверхности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Щербань А.П. Получение высокочистых металлов для производства низкофоновых сцинтилляционных детекторов редких событий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2011. — № 6. — С. 3–10.
2. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Solopikhin D.A. et al. Production of radiopure natural and isotopically enriched cadmium and zinc for low background scintillators // Functional materials. — 2011. — Vol. 18, N 1. — P. 121-127.
3. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich, F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead // Inorganic Materials. — 2011. — Vol. 47, N. 6. — P. 645–648.
4. Пат. 22541 України. Спосіб рафінування металів / С.Ю. Ларкін, Г.П. Ковтун, О.П. Щербань. — 2007. — Бюл. № 5.
5. Пат. 94547 України. Пристрій для рафінування металів дистиляцією у вакуумі / Г.П. Ковтун, О.П. Щербань, Д.О. Солопихін. — 2011. — Бюл. № 9.
6. Вирич В.Д., Горбенко Ю.В., Дафинея И. и др. Получение высокочистого гранулированного цинка для низкофоновых экспериментов LUCIFER // Материалы докладов 3-й Международной конференции «Высокочистые материалы; получение, применения, свойства». — Украина, г. Харьков. — 2015. — С. 8.
7. Кондрик А. И., Солопихин Д. А., Щербань А. П. Рафинирование Cd и Zn от примесей внедрения при дистиляции с геттерным фильтром ZrFe // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 5. — С. 31–36.
8. Ковтун Г.П., Щербань А.П., Солопихин Д.А. и др. Исследование процесса получения высокочистого цинка как составляющего элемента детекторов ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. — 2008. — № 1. — С. 20–23.
9. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. — Москва: Изд-во АН СССР, 1961.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.01 2017 г.

О. П. ЩЕРБАНЬ, Г. П. КОВТУН, Ю. В. ГОРБЕНКО,
Д. О. СОЛОПІХІН, В. Д. ВІРИЧ, Л. О. ПИРОЖЕНКО

Україна, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»
E-mail: shcherban@kipt.kharkov.ua

ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОЧИСТИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ МЕТАЛІВ: КАДМІЮ, ЦИНКУ, СВИНЦЮ

Запропоновано комплексні процеси глибокого рафінування кадмію, цинку і свинцю дистиляцією у вакуумі. Розроблено пристрій для одержання гранул. Досліджено процес гранулювання металів високої чистоти. Чистота одержуваних гранул кадмію і цинку більша за 99,9999, а гранул свинцю — більша за 99,9995 мас. %. Для запобігання окисленню гранул металів при зберіганні на повітрі проведені дослідження процесів пасивації їх поверхні хімічним методом. Підвищенню стійкості до атмосферної корозії гранул сприяє застосування органічних розчинників на основі диметлформаміду як охолодної рідини у процесі гранулювання Cd, Zn і Pb високої чистоти.

Ключові слова: метали високої чистоти, кадмій, цинк, свинець, рафінування, дистиляція у вакуумі, гранулювання, пасивація поверхні.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1-2.55
UDC 669.054

A. P. SHCHERBAN, G. P. KOVTUN, Y. V. GORBENKO,
D. A. SOLOPIKHIN, V. D. VIRICH, L. A. PIROZHENKO

Ukraine, Kharkiv, National Science Center
«Kharkiv Institute of Physics and Technology»
E-mail: shcherban@kipt.kharkov.ua

PRODUCTION OF HIGH PURITY GRANULAR METALS: CADMIUM, ZINC, LEAD

Cadmium, zinc and lead are constituent components of many semiconductor compounds. The obtained high purity distillates and ingots are large-size elements, which is not always convenient to use, and thus require additional grinding, which does not always allow maintaining the purity of the original materials. For the growth of semiconductor and scintillation single crystals it is advisable to use «friable» granular high-purity distillates, which can be processed without the risk of contamination. For example, the European low-background experiment LUCIFER required more than 20 kg of high-purity granulated zinc, which was agreed to be supplied by NSC KIPT. This task was then extended to cadmium and lead.

Motivated by these tasks, the authors of this paper propose complex processes of deep refining of cadmium, zinc and lead by vacuum distillation. A device producing granules has been developed. The process of granulation of high-purity metals is explored.

The purity of produced granules for cadmium and zinc is >99,9999, and >99,9995% for lead granules. To prevent oxidation of metal granules during exposition to air, chemical methods of surface passivation were used. Organic solvent based on dimethylformamide used as a coolant improves the resistance of granules to atmospheric corrosion during the granulation of high purity Cd, Zn and Pb.

Keywords: high purity metals, cadmium, zinc, lead, refining, vacuum distillation, granulation, surface passivation.

REFERENCES

1. Shcherban A.P. Obtaining high purity metals for low background scintillating detectors of rare events. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2011, no. 6, pp. 3-10. (Rus)
2. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Solopikhin D.A., Virich V.D., Zelenskaja V.I., Boiko R.S., Danevich F.A., Kudovbenko V.M., Nagorny S.S. Production of radiopure natural and isotopically enriched cadmium and zinc for low background scintillators. *Functional materials*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 121-127.
3. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich, F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 645-648.
4. *Patent 22541 Ukraine*. Larkin S.Yu., Kovtun G.P., Shcherban A.P. [Method refining of metals]. Bul. 5, 2007. (Ukr)
5. *Patent 94547 Ukraine*. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Solopikhin D.A. [A device for refining metals by distillation in a vacuum]. Bul. 9, 2011. (Ukr)
6. Virich V.D., Gorbenko Yu.V., Dafinei I. et al. [Production of high purity granulated zinc for low background experiment LUCIFER]. *3rd International Conference "High purity materials: preparation, application, property"*, Ukraine, Kharkov, 2015, p. 8. (Rus)
7. Kondrik A. I., Solopikhin D. A., Scherban' A. P. Refining of Cd and Zn from interstitial impurities using distillation with a ZrFe getter filter. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 5, pp. 31-36. (Rus)
8. Kovtun G.P., Shcherban A.P., Solopikhin D.A., Svinarenko A.P., Virich V.D., Kisil E.P., Phillipovich L.I. [Research of process obtaining high purity zinc as constituent element of detectors ionizing radiation]. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2008, no. 1, pp. 20-23. (Rus)
9. Nesmeyanov A.N. *Davlenie para khimicheskikh elementov* [The vapor pressure of the chemical elements]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, 396 p. (Rus)

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2016 г.

Новые технологии

Радиационно стойкая фотоструктура на основе $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ для диода Шоттки. А. А. Ащеулов, А. В. Галочкин, И. С. Романюк, С. Г. Дремлюженко 2–3

Новые конструктивно-технологические решения светодиодных модулей для ламп-ретрофитов. В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук, М. А. Проценко, Г. И. Никитский, А. А. Фомин, Л. А. Назаренко, В. М. Сорокин, А. В. Рыбалочка, А. С. Олейник 6

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Омические контакты к материалам на основе нитрида индия. П. О. Сай (на английском языке) 4–5

Электронные средства: исследования, разработки

Расчет упругих элементов в конструкциях электрических соединителей на основе гибких печатных кабелей. А. А. Ефименко, С. В. Мерлян 2–3

Проектирование многозондовых устройств для тестирования электронных компонентов с шариковыми выводами. И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова 2–3

Экспериментальное исследование переходных процессов в программно-аппаратном устройстве цифровой фазовой автоподстройки частоты. А. П. Бондарев, С. И. Алтунин 4–5

Несущие конструкции с повышенными компоновочными характеристиками. А. А. Ефименко, А. П. Карлангач 4–5

Электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктур $\text{NiO/p-CdTe/n-NiO/n-CdTe}$. Г. П. Пархоменко, П. Д. Марьянчук 4–5

Проектирование электронной аппаратуры на основе стандартных несущих конструкций с использованием ресурсов Internet. А. П. Карлангач (на украинском языке) 6

СВЧ-техника

Твердотельные СВЧ-модули для радиотехнической аппаратуры и систем миллиметрового диапазона длин волн. Н. Ф. Карушкин, С. Б. Мальцев, В. А. Хитровский 1

Особенности конструктивно-технологических решений приемной системы малых радиотелескопов. Э. Н. Глушеченко, А. М. Пилипенко, Э. В. Слонин, И. К. Сундучков, В. В. Чмилъ 2–3

Коммутационные управляемые устройства на $p-i-n$ -диодах миллиметрового диапазона длин волн. Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, В. В. Ореховский, А. А. Тухаринов 4–5

Системы передачи и обработки сигналов

Метод измерения амплитудной диаграммы направленности зеркальных параболических антенн в звуковом диапазоне частот. А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, М. Т. Аляхамиди, А. М. Алхади 1

Рекуррентные алгоритмы настройки адаптивных решетчатых фильтров. Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка 2–3

Эффективность методов синтеза последовательностей со свойством «не более одного совпадения». А. И. Неврев, О. Н. Галчёнков 2–3

Обнаружение аномальных измерений при обработке данных малого объема. В. С. Попукайло 4–5

Энергетическая электроника

Анализ энергетических и магнитных процессов в дросселях импульсных преобразователей электрической энергии. А. Ф. Кадацкий, А. П. Русу 6

Сенсоэлектроника

Детекторные свойства $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ под влиянием гамма-облучения малой дозы. А. И. Кондрик 1

Исследование частотной зависимости проводимости нитевидных кристаллов крем-

ния при криогенных температурах для создания сенсоров температуры на их основе. *А. А. Дружинин, И. П. Островский, Ю. Н. Ховерко, Р. Н. Корецкий*

4–5

Функциональная микро- и нано-электроника

Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии. *В. П. Сидоренко, Ю. В. Прокофьев, Д. С. Мурченко, В. М. Еременко, А. В. Шелехов*

4–5

Обеспечение тепловых режимов

Система управления тепловыми режимами электронных приборов. *И. В. Цевух, В. В. Спивак, А. И. Малюта, Т. Н. Шуба*

1

Интенсификация теплопередачи в жидкостных теплообменниках с каверна-штыревым оребрением. *В. Е. Трофимов, А. Л. Павлов*

1

Модель взаимосвязи геометрии ветвей термоэлементов и показателей надежности однокаскадных охладителей в режиме Q_0 max. *В. П. Зайков, В. М. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв*

4–5

CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве. *В. Е. Трофимов, А. Л. Павлов, Е. А. Мокроусова*

6

Технологические процессы и оборудование

Исследование линейной корреляционной связи в парных выборках малого объема. *В. С. Попускайло*

1

Алгоритм выбора интервала пересчета параметров объектов контроля и управления в АСУ ТП. *А. Н. Тыныныка*

1

Материалы электроники

Высокотемпературная люминесценция кристаллов $ZnSe:Yb$. *В. П. Махний, О. В. Кинзерская, И. М. Сенко, А. М. Слётов*

2–3

Синтез и исследование нанопорошков ферромолибдата стронция с высокой степенью сверхструктурного упорядочения для спинтроники. *М. В. Ярмолич, Н. А. Каланда, С. Е. Демьянов, М. В. Силибин, Г. Г. Горох*

2–3

Влияние самоинтеркаляции меди на термоэлектрические свойства легированных кристаллов $Bi_2Te_3<Cu>$ в процессе их хранения. *А. П. Алиева, С. Ш. Кахраманов, А. Ш. Кахраманов*

2–3

Влияние морфологии поверхности подложек $ZnSe:Te$ на их оптические свойства. *В. П. Махний, И. И. Герман, Г. И. Бодюл, И. М. Сенко*

6

Метрология. Стандартизация

Измерение амплитудной диаграммы направленности и частотной характеристики антенн ISM-диапазона с помощью WiFi-маршрутизаторов. *А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, И. В. Цевух, И. А. Валянский, Ю. С. Чихрай*

6

К истории науки и техники

Роль личности в научном прогрессе (к 80-летию со дня рождения Л. Г. Гассанова) *Э. Н. Глушеченко, Т. Н. Нарытник*

2–3

Библиография

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2015 г.

1

Index of articles published in «Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature» in 2016

Modern electronic technologies

Radiation-resistant photostructure for Schottky diode based on $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$. A. A. Ashcheulov, A. V. Galochkin, I. S. Romanyuk, S. G. Dremluzhenko 2–3

The new design and technological solutions for the led modules for retrofit lamps. V. M. Borshchov, O. M. Listratenko, M. A. Protsenko, I. T. Tymchuk, G. I. Nikitskiy, O. O. Fomin, L. A. Nazarenko, V. M. Sorokin, A. V. Rybalochka, O. S. Oleinik 6

New components for electronic equipment

Ohmic contacts to InN-based materials. P. O. Sai (in English) 4–5

Electronic devices: research, development

An elastic elements calculation in the construction of electrical connectors based on flexible printed cables. A. A. Yefimenko, S. V. Merlyan 2–3

Design of multiprobe devices for electronic components with ball leads testing. I. Sh. Nevlyudov, V. A. Palagin, E. A. Razumov-Frizyuk, I. V. Zharikova 2–3

Experimental research of transient processes in firmware digital phase-locked loop. A. P. Bondariev, S. I. Altunin 4–5

Mechanical structures with enhanced layout characteristics. Yefimenko A. A., Karlangach A. P. 4–5

Electrical and photoelectric properties of heterostructures NiO/p-CdTe and NiO/n-CdTe . H. P. Parkhomenko, P. D. Maryanchuk 4–5

Designing electronic equipment on the basis of standard mechanical structures using Internet resources. A. P. Karlangach 6

Microwave engineering

Solid state microwave modules designed for millimeter wave electronic equipment and systems. N. F. Karushkin, S. B. Maltsev, V. A. Khitrovskiy 1

Features of structural and technological solutions for receiving system of small radio telescopes. E. N. Gluschechenko, A. M. Pylypenko, E. V. Slonin, I. K. Sunduchkov, V. V. Chmil 2–3

Millimeter wave $p-i-n$ -diode switching controlled devices. N. F. Karushkin, V. V. Malysko, V. V. Orekhovskiy, A. A. Tuharinov 4–5

Signals transfer and processing systems

Method of measuring the amplitude directivity pattern of parabolic mirrored antennas in the audio frequency range. A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, M. T. Al'khamidi, A. M. Alkhadi 1

Recursive algorithms of adaptive lattice filters adjustment. D. I. Lekhovyt'skiy, V. P. Riabukha, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka 2–3

Efficiency of sequence synthesis methods with the "not more than one match" property. A. I. Nevrev, O. N. Galchenkov 2–3

Detection of outliers in processing of small size data. V. S. Popukailo 4–5

Power electronics

The analysis of energy and magnetic processes in inductors switched-mode electrical energy converters. A. F. Kadatsky, A. P. Rusu 6

Sensors

Detector properties of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ under the influence of low dose gamma irradiation. A. I. Kondrik 1

A study of the frequency dependence of conductivity of silicon whiskers at cryogenic temperatures as basis for the temperature sensors. A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovsky, Yu. N. Khoverko, R. N. Koretsky 4–5

Functional micro- and nanoelectronics

Coordinate-sensitive charged particle detector for spectroscopy. V. P. Sidorenko, Yu. V. Prokofiev, D. S. Murchenko, V. M. Yermenko, A. V. Shelekhov 4–5

Thermal management

Thermal management system for electronic devices. I. V. Tsevukh, V. V. Spivak, A. I. Malyuta, T. I. Shuba 1

Intensification of heat transfer in liquid heat exchangers with dimple-pin finning. V. Ye. Trofimov, A. L. Pavlov	1	ordering for promising spintronics devices. M. V. Yarmolich, N. A. Kalanda, S. E. Demyanov, M. V. Silibin, G. G. Gorokh	2–3
Model of correlation between geometry of thermoelectric branches and reliability indicators of single-stage coolers in Q_{0max} mode. V. P. Zaikov, V. M. Meshcheryakov, Yu. I. Zhuravlev	4–5	Influence of copper intercalation on thermoelectric properties change in $Bi_2Te_3<Cu>$ doped crystals during storage. A. P. Aliyeva, S. Sh. Gahramanov, A. Sh. Gahramanov	2–3
CFD-simulation of radiator for air cooling of microprocessors in a limited space. V. A. Trofimov, A. L. Pavlov, E. A. Mokrousova	6	Influence of ZnSe:Te substrate's surface morphology on their optical properties. V. P. Makhniy, I. I. Herman, G. I. Bodul, I. M. Senko	6
Production technology and equipment		Metrology. Standardization	
The linear correlation research in paired small volume samples. V. S. Popukaylo	1	Measurement of the amplitude pattern and the frequency characteristic of ISM-band antennas using WiFi routers. A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, I. V. Tsevkukh, I. A. Valyanskii, Yu. S. Chikhrai	6
The algorithm for selection of interval of parameters recalculation of control and management objects in automatic control systems of process engineering. A. N. Tynynyka	1	On the history of science and engineering	
Materials of electronics		Role of personality in scientific advancement (dedicated to the eightieth anniversary of the birth of Lev G. Gassanov) Ye. M. Glushechenko, T. N. Narytnik	
High temperature luminescence of ZnSe:Yb crystals. V. P. Makhniy, O. V. Kinzerska, I. M. Senko, O. M. Slyotov	2–3	2–3	
Synthesis and study of strontium ferromolybdate nanopowders with high degree of superstructural		Bibliography	
		Index of articles published in the journal in 2015	1

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев
- Готра Зенон Юрьевич*, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
- Кондрик Александр Иванович*, ведущий инженер-исследователь, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
- Круковский Ростислав Семенович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НВП «Карат» — ДП ПАТ «Концерн-Электрон», г. Львов
- Садченко Андрей Валерьевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Сафронов Павел Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Ушенко Александр Григорьевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
- Хайрнатов Сергей Манисович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по тематическим направлениям, с которыми можно ознакомиться на сайте журнала.

3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухстороннее закрытое рецензирование.

4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.

5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар.

6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации (подробнее см. на сайте журнала).

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

— название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;

— аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;

— ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;

— описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости A от B . Из рисунка видно, что при возрастании B значение A монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании B значение A монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

— выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте.

10. Тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) для русскоязычной статьи нужно привести на украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи. При этом англоязычная аннотация должна быть представлена в расширенном виде (до 250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).

Для статей на английском языке приводится краткая аннотация (50–100 слов), а также перевод тематической информации на русский и украинский (по возможности).

11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан.

12. При наборе текста статьи использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилён, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

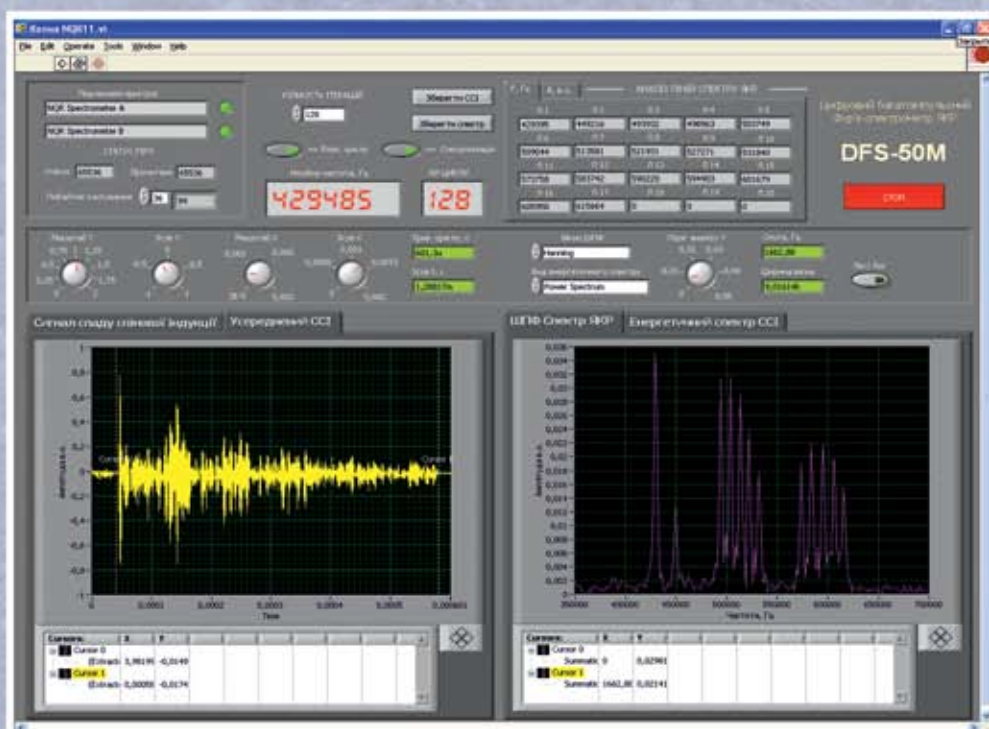
15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).

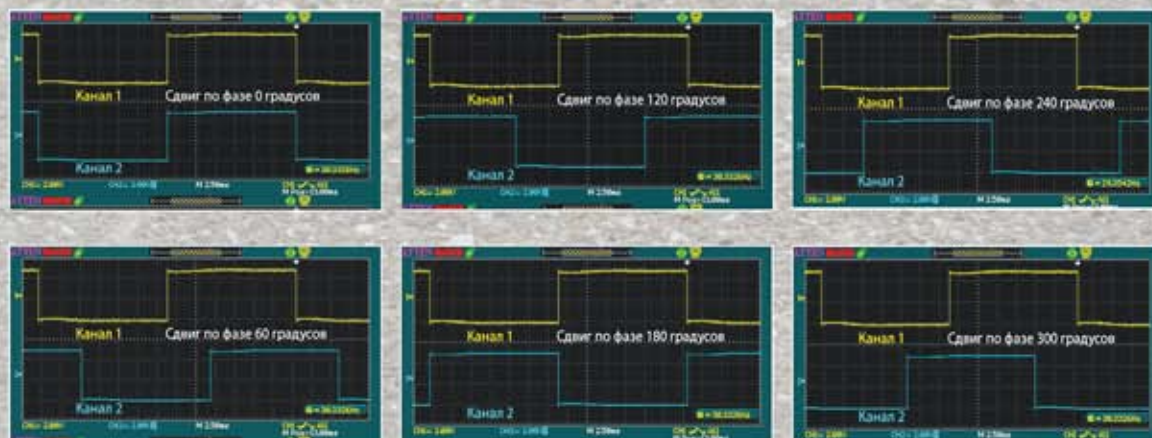
17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruirovane v Elektronnoi Apparature».

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).

К статье «Апаратно-програмна реалізація системи збору даних для імпульсного спектрометра ЯКР»



К статье «Генератор для электротерапии и стимуляции нервных центров человека»



Номер готовили
Киев, Львов, Минск, Одесса,
Трускавец, Харьков, Черновцы



Пишите
Подписывайтесь
Читайте