

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ¹, к. т. н. И. А. БУЧКОВСКИЙ², к. т. н. И. С. РОМАНЮК¹

Украина, г. Черновцы, ¹Завод «Кварц», ²ЧНУ имени Юрия Федьковича

E-mail: ashchelovaa@rambler.ru

УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭКСПРЕСС-ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Показана возможность применения вихретокового метода для бесконтактного определения основных параметров термоэлектрических материалов, таких как эффективность, коэффициенты термо-эдс, электропроводности и теплопроводности. Приведена схема установки, реализующей данный метод, а также результаты проведенных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: вихревой ток Фуко, сила Ампера, эффекты Пельтье и Джоуля, термоэлектрический материал, термо-эдс, теплопроводность, электропроводность, термоэлектрическая эффективность.

Основными параметрами термоэлектрического материала являются коэффициенты термо-эдс α , электропроводности σ и теплопроводности χ , а также его эффективность Z [1]. В настоящее время известно достаточное количество методов их определения [2, 3], в том числе и путем последовательного измерения электропроводности термоэлектрического образца в изотермических и адиабатических условиях [4]. Однако наличие необходимых при таких измерениях электрических контактов на контролируемых образцах ведет к известным неудобствам и возрастанию погрешности этих методов. В [5] была показана перспективность вихретокового метода бесконтактного определения электропроводности термоэлектрических материалов при сравнительно малой погрешности, а позднее было разработано устройство для его реализации [6].

В настоящей работе предлагается устройство, основанное на вихретоковом методе, позволяющем определять основные параметры термоэлектрических материалов, такие как эффективность, коэффициенты термо-эдс, электропроводности и теплопроводности.

Краткое описание метода

Физические эффекты взаимодействия электромагнитного поля с исследуемым веществом, которые лежат в основе реализации вихретокового метода для измерения параметров материалов, были рассмотрены в [5–8]. В этих работах показано, что в случае размещения контролируемого образца в зазоре сердечника катушки индуктивности, которую питает асимметричный ток, возникает магнитное поле с индукцией B , состоящей из переменной синусоидальной (B_1) и постоянной (B_0) составляющих. Переменная составляющая индуцирует в образце ток Фуко,

каждый полупериод которого характеризуется наличием собственной магнитной индукции. Взаимодействие этих составляющих ведет к появлению как радиальных, так и аксиальных составляющих сил Ампера. Аксиальные составляющие вызывают смещение отрицательного и положительного полупериодов токов Фуко к верхней и нижней торцевым граням образца, а радиальные составляющие приводят к изменению эффективного радиуса действия магнитного поля $R_{\text{эф}}$. Такое зонально-объемное расслоение полупериодов индуцированного тока ведет к значительному объемному перераспределению тепловых потоков, вызванных эффектами как Джоуля ($q_{\text{ср.Дж}}$), так и Пельтье ($q_{\text{ср.П}}$). Реализация предлагаемого метода осуществляется путем определения потерь электрической мощности при возникновении вихревых токов в образце.

Минимизация погрешности этого метода проводилась путем компьютерного моделирования физических процессов, происходящих при измерениях, с помощью пакета программ ComsolFenlab 3.3. В результате этих исследований установлено, что для термоэлектрических материалов на основе соединений Bi-Te-Se-Sb [7] рабочая частота измерительного колебательного контура должна выбираться в диапазоне 36–250 кГц, а протекающий через контур ток — с учетом неравенства $q_{\text{ср.П}}/q_{\text{ср.Дж}} \geq 10q$. Отношение значений индукции магнитного поля и ее составляющих выбирается из условия $B_0/B \geq 8,6$, что также отвечает условиям минимального воздействия со стороны гальванотермомангнитных явлений [9].

В [8] было показано, что при наличии значений электрической добротности измерительного контура без образца (Q_1) и с образцом в случае протекания симметричного и асимме-

тричного тока (соответственно, Q_2 и Q_3) можно определить усредненные значения асимметричной электропроводности материала σ_a и его термоэлектрической добротности Z_{cp} :

$$\sigma_a = c \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1 Q_3 d \left(1 + 4 \ln \frac{R_0}{R_{эф}} \right)}, \quad (7)$$

$$Z_{cp} = \frac{1}{T} \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 - Q_3}, \quad (8)$$

где c — коэффициент, $c = \frac{\pi \omega \mu_0 (\mu'_n)^2 R_{эф} l_{cp}}{8 \mu'_n S}$;

d — ширина зазора;

R_0 — радиус кольцевого датчика;

T — температура;

ω — круговая частота измерительного колебательного контура;

μ_0, μ'_n — динамические магнитные проницаемости образца и ферритового сердечника контура соответственно;

l_{cp} — средняя длина магнитной силовой линии;

I_{ϕ} — ток смещения ферритового сердечника.

Далее, на основании приведенных в [8] формул были получены выражения для вычисления коэффициентов термо-эдс α_{cp} и теплопроводности χ_{cp} :

$$\alpha_{cp} = \sqrt{\frac{2q_{cp\Pi}}{\sigma_a T^2} \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1 - Q_2}} = \sqrt{\frac{2q_{cp\Pi} Q_1 Q_3 c \left(1 + 4 \ln \left(R_0 / R_{эф} \right) \right)}{Q_1 - Q_2}}, \quad (9)$$

$$\chi_{cp} = Z_{cp} dq_{cp\Pi}(x_0, y_0, z_0) = \frac{\omega L I_2^2}{\pi R_{эф}^2} \frac{d}{T} \frac{Q_1 - Q_3}{Q_1 - Q_2} \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2 Q_3}. \quad (10)$$

Следует отметить, что при измерении параметров материала в соответствии с предлагаемой методикой образец должен быть соответствующим образом ориентирован относительно заданного направления вектора магнитного поля, возникающего в зазоре магнитопровода измерительного колебательного контура [9, 10]. Например, образец из анизотропного термоэлектрического материала необходимо располагать так, чтобы выбранные кристаллографические оси лежали в плоскости торцевой грани (диаметром $2R_{эф}$ и толщиной δ), а при исследовании термоэлектрически неоднородного материала торцевой гранью образца должна служить плоскость с максимальной неоднородностью. Измерение параметров термоэлектрически однородного матери-

ала может проводиться на образцах, выполненных, например, из двух геометрически одинаковых полудисков, находящихся в электрическом и тепловом контактах. Один из полудисков выполняется из эталонного термоэлектрически однородного материала с известными параметрами, а второй — из контролируемого материала.

Особенности конструкции устройства для бесконтактного определения параметров термоэлектрических материалов

С целью реализации вихретокового бесконтактного метода для определения основных параметров термоэлектрических материалов была проведена модернизация устройства, представленного в [6, 7]. Модернизированное устройство позволяет бесконтактно измерять усредненное значение не только симметричной электропроводности σ_c , но и асимметричной σ_a , необходимое для определения параметров термоэлектрических материалов. С этой целью в его измерительный датчик введена дополнительная индуктивность. Протекающий через нее постоянный ток создает в рабочем зазоре постоянное подмагничивающее поле, формирующее необходимые физические процессы в объеме контролируемого образца. Однако, в то же время, это поле влияет и на характеристики материала ферромагнитного сердечника измерительного датчика, изменяя его индуктивность и величину электромагнитной связи с контролируемым образцом. Соответственно изменяется и резонансная (рабочая) частота датчика, а также его чувствительность по сравнению с этими же параметрами при нулевом токе подмагничивания. Эти изменения обуславливают существенное искажение результатов измерения основных параметров термоэлектрических материалов.

Использование измерительного датчика, схема которого приведена на **рис. 1**, позволило устранить зависимость его индуктивности от тока подмагничивания. Конструктивно датчик состоит из двух идентичных ферритовых колец с катушками подмагничивания L_3 и L_4 , включенных электрически последовательно-встречно, а также рабочей катушки L_1 , намотанной одновременно

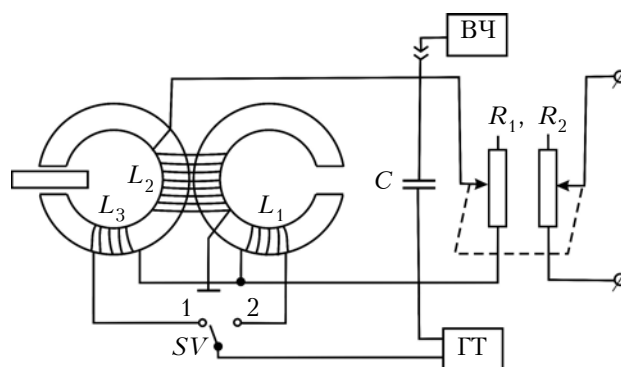


Рис. 1. Схема включения измерительного датчика с подмагничиванием

на оба ферритовых кольца. Индуктивности L_3 и L_4 через переключатель SV подключены к генератору постоянного тока ГТ, а индуктивность L_1 совместно с конденсатором C образует параллельный колебательный контур, подключенный к генератору высокочастотного тока ВЧ, рабочая частота f_p которого равна резонансной частоте $f_0 LC$ -контра. Спаренные переменные резисторы R_1 и R_2 обеспечивают контроль тепловых потерь, вносимых в LC -контур при размещении контролируемого образца в рабочем зазоре датчика. Если переключатель SV находится в положении 1, то измеряется асимметричная электропроводность σ_a , а подмагничивающее поле воздействует на параметры и образца, и ферритового кольца с индуктивностью L_3 . Когда переключатель SV находится в положении 2, измеряется симметричная электропроводность σ_c (подмагничивающее поле в рабочем зазоре отсутствует, в этом случае изменяются параметры ферритового кольца с индуктивностью L_4 , через

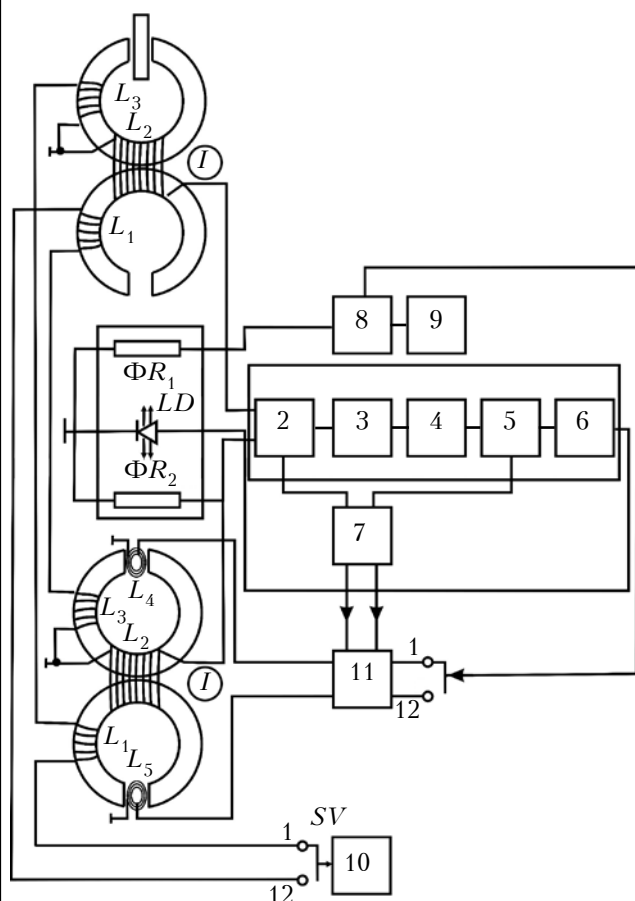


Рис. 2. Структурная схема устройства для бесконтактного измерения симметричной σ_c и асимметричной σ_a электропроводности термоэлектрических материалов: 1, 12 — положение переключателя SV ; 2 — электронный коммутатор; 3 — автогенератор; 4 — усилитель переменного тока; 5 — синхронный детектор; 6 — усилитель постоянного тока; 7 — генератор импульсов; 8 — блок обработки сигнала; 9 — индикаторное устройство; 10 — индикатор постоянного тока; 11 — узел коррекции; ΦR_1 , ΦR_2 — фоторезисторы

которую протекает соответствующий ток подмагничивания). Поскольку ферритовые кольца с индуктивностями L_3 и L_4 идентичны, а токи через них в обоих случаях одинаковы, изменение параметров ферритовых колец при любом положении переключателя SV не влияет на величину индуктивности L_1 , а соответственно, и на резонансную частоту $f_0 LC$ -контра.

Полная блок-схема модернизированного устройства приведена на рис. 2. В зазоре второго датчика с индуктивностью L_2 размещены микродатчики переменного магнитного поля (в виде специальных микроиндуктивностей L'_5 и L''_5). Устройство содержит переключатель SV и генератор постоянного тока 10, аналогичный устройству, представленному на рис. 1, а также узел сравнения 11, аналогичный использованному в [6, 7]. Выходной сигнал этого узла пропорционален изменению чувствительности индуктивного датчика при воздействии тока подмагничивания, который далее с помощью блока 8 используется для автоматической коррекции показаний выходного прибора. Блок 2 собран по схеме амплитудных детекторов, а блок 3 — по схеме сумматора.

Реальную работу созданного устройства иллюстрируют приведенные на рис. 3 временные диаграммы напряжений на индуктивностях L_1 и L_2 датчиков, а также индукции магнитного поля в рабочем зазоре датчика с индуктивностью L_1 при наличии подмагничивания и при его отсутствии, что соответствует положениям 1 и 2 переключателя SV , т. е. режимам измерения асимметричной (σ_a) и симметричной (σ_c) электропроводности. При измерении σ_c выходной сигнал блока 11 через переключатель SV поступа-

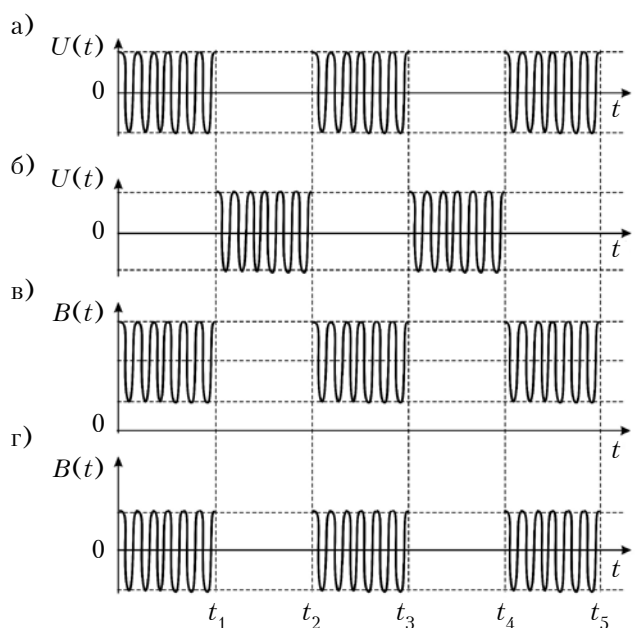


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений (а, б), а также индукции магнитного поля в рабочем зазоре датчика (в, г) при отсутствии подмагничивания (а, в) и при его наличии (б, г)

ет на блок 8, измеряющий сопротивление фоторезистора ΦR_1 и корректирующий его значение в соответствии с изменением чувствительности измерительного датчика.

Заключение

Измерения параметров образцов твердых растворов Bi—Te—Se—Sb показали, что реальная погрешность измерений составляет около 2%. Это указывает на то, что вихретоковый метод может успешно использоваться для бесконтактного измерения основных параметров термоэлектрических материалов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. — М.—Л.: Изд. АН СССР, 1960.
2. Harman T.C., Cahn J.H., Logan M.J. Measurement of thermal conductivity by utilization of Peltier effect // J. Appl. Phys. — 1959. — Vol. 30, N 9. — P. 1351—1359. — DOI: 10.1063/1.1735334.
3. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — Москва: Высшая школа, 1987.
4. Вайнер А.Л. Термоэлектрические параметры и их измерение. — Одесса: Негоциант, 1998.

5. Суринов Ю.В., Шимко В.И., Матвеев В.В. Бесконтактный метод измерения удельного сопротивления пластин полупроводников и эпитаксиальных слоев. // Заводская лаборатория. — 1966. — Т. 32, № 9. — С. 1086—1088.

6. Ащеулов А.А., Бучковский И.А., Романюк И.С. Установка для бесконтактного измерения электропроводности полупроводников // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 2. — С. 55—57.

7. Ащеулов А.А., Горобець М.В., Добровольський Ю.Г., Романюк І.С. Термоелектричні модулі Пельтьє на основі кристалів твердих розчинів Bi—Te—Se—Sb. — Чернівці: Прут, 2011.

8. Ащеулов А.А. Бесконтактный метод определения эффективности термоэлектрических материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 43—45.

9. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термоманитные методы превращения энергии. — Черновцы: Рута, 2006.

10. Пат. 29213 України. Процес визначення добротності термоелектричних матеріалів / Ащеулов А. А., Бучковский И.А., Величук Д.Д. — 2008. — Бюл. №1.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.02 2015 г.

А. А. АЩЕУЛОВ¹, И. А. БУЧКОВСКИЙ², И. С. РОМАНЮК¹

Україна, м. Чернівці, ¹Завод «Кварц», ²ЧНУ імені Юрія Федьковича
E-mail: ashchelovaa@rambler.ru

ПРИСТРІЙ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ЕКСПРЕС-ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Упоказана можливість застосування вихрострумового методу для безконтактного вимірювання основних параметрів термоелектричних матеріалів, таких як ефективність, коефіцієнти термо-ерс, електропровідності і теплопровідності. Наведено схему установки, що реалізує даний метод, а також результати проведених експериментальних досліджень.

Ключові слова: вихровий струм Фуко, сила Ампера, ефекти Пельтьє та Джоуля, термоелектричний матеріал, термо-ерс, теплопровідність, електропровідність, термоелектрична ефективність.

DOI: 10.15222/TKEA2015.4.42
UDC 621.36.5

A. A. ASHCHEULOV¹, I. A. BUCHKOVSKI², I. S. ROMANYUK¹

Ukraine, Chernivtsi, ¹LLC «Quartz»,
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: ashchelovaa@rambler.ru

EXPRESS METHOD FOR CONTACTLESS MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THERMOELECTRIC MATERIALS

The paper presents an original method for contactless express measurement of parameters of thermoelectric materials.

The presence of a combination of AC and DC magnetic fields in the gap of the oscillating circuit, where the monitored sample of the thermoelectric material is located, leads — due to Ampere force — to delamination of geometric regions of the occurrence of Foucault current. This in turn causes the appearance of additional heat losses in the oscillating circuit caused by Peltier effect.

Computer modeling of these processes with the use of the software package ComsolFenlab 3.3 allowed determining the nature and magnitude of the electric currents in oscillating circuit, the range of operating frequencies, and the ratio of amplitudes of the variable and fixed components of the magnetic field. These components eventually cause a certain temperature difference along the controlled sample, which difference is proportional to the thermoelectric figure of merit Z of the material.

The basic expressions are obtained for determining the value of the Seebeck coefficient α , thermal conductivity χ , electrical conductivity σ and thermoelectric figure of merit Z .

A description is given to the design of the device for contactless express measurement of parameters of thermoelectric materials based on Bi–Te–Se–Sb solid solutions. Its distinctive feature is the ability to determine the symmetric and asymmetric components of the electric conductivity of the material values. The actual error in parameter measurement in this case is 2%.

Keywords: eddy current Foucault, Ampere, Peltier and Joule effects, thermoelectric material, the thermoelectric power, thermal conductivity, electrical conductivity, thermoelectric figure of merit.

REFERENCES

1. Ioffe A.F. *Poluprovodnikovye termoelementy* [Semiconductor thermoelements]. Moscow-Leningrad, Publ. house of AS USSR, 1960, 346 p. (Rus)
2. Harman T.C., Cahn J.H., Logan M.J. Measurement of thermal conductivity by utilization of Peltier effect. *J. Appl. Phys.*, 1950, vol. 30, no. 9, pp. 1351-1359. DOI: 10.1063/1.1735334.
3. Pavlov L.P. *Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovykh materialov* [Methods of measuring the parameters of semiconductor materials]. Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 240 p. (Rus)
4. Vainer A. *Termoelektricheskie parametry i ikh izmerenie* [Thermoelectric parameters and their measurement]. Odessa, Negotsiant, 1998, 68 p. (Rus)
5. Surin J.V., Shimko V.I., Matveev V.V. [Non-contact method of measuring the resistivity of the semiconductor wafers and epitaxial layers]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1966, vol. 32, no. 9, pp. 1086-1088. (Rus)
6. Ashcheulov A.A., Buchkovskii I.A., Romanyuk I.S. [Device for contactless measurement of electroconductivity of semiconductors]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2007, no. 2, pp. 55-57. (Rus)
7. Ashcheulov A.A., Gorobets' M.V., Dobrovol'skii Yu.G., Romanyuk I.S. *Termoelektrichni moduli Pel't'ye na osnovi kristaliv tverdikh rozchiniv* [Pelt'ye thermoelectric modules based on crystals of solid solutions Bi-Te-Se-Sb]. Chernivtsi, Prut, 2011, 168 p. (Ukr)
8. Ashcheulov A.A. [Non-invasive method of determination of thermoelectric materials figure of merit]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2009, no. 2, pp 43-45. (Rus)
9. Samoilovich A.G. *Termoelektricheskie i termomagnitnye metody prevrashcheniya energii* [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]. Chernivtsi, Ruta, 2006, 228 p. (Rus)
10. Ashcheulov A.A., Buchkovskii I.A., Velichuk D.D. [The process of determining the quality factor of thermoelectric materials]. *Pat. UA no 29213*, 2008. (Rus)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Алиева Алмаз Паша-кызы*, канд. техн. наук, доцент, Азербайджанский технический университета, г. Баку
- Бондарев Андрей Петрович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Национальный университет «Львовская политехника»
- Браиловский Владимир Васильевич*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев
- Дружинин Анатолий Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Ковалюк Захар Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, руководитель Черновицкого отделения Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Николенко Анатолий Александрович*, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Остапенко Владимир Михайлович*, начальник отдела, ЦКБ «Ритм», г. Черновцы
- Проценко Иван Ефимович*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Сумский государственный университет
- Смирнов Алексей Борисович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Фаст Владимир Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»
- Цона Александр Иванович*, докт. техн. наук, старший научный сотрудник, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Юрьев Василий Григорьевич*, начальник СКБ, ЦКБ «Ритм», г. Черновцы