

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ**

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE**

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія:  
Електроенергетика та  
перетворювальна техніка**

**№ 1 2019**

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків  
НТУ «ХПІ», 2019

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: Electricity  
and conversion technology**

**No 1 2019**

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2019

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка** = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Электроэнергетика та перетворювальна техніка = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Electricity and conversion technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 1. – 85 с. – ISSN 2079-4525.

Видання створено для висвітлення досягнень в галузі електроенергетики та перетворювальної техніки, приладів та методів неруйнівного контролю, діагностики, визначенню фізико-механічних характеристик матеріалів, метрології та інформаційно-виміральної техніки. Публікуються статті, присвячені теоретичному аналізу та обґрунтуванню застосування методів неруйнівного контролю матеріалів, удосконаленню приладів та методів неруйнівного контролю, питанням метрології та інформаційно-виміральної техніки, системотехніки, програмного та комп'ютерного забезпечення вимірювань, впровадженню методів неруйнівного контролю у виробництво.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі неруйнівного контролю, метрології та інформаційно-виміральної техніки.

The publication was created to highlight the achievements in the field of electric power and converting technology, tools and methods of non-destructive testing, diagnostics, the study of physical and mechanical characteristics of materials, metrology and information and measuring equipment. Articles are published on the theoretical analysis and justification of the application of non-destructive testing of materials, the improvement of tools and methods of non-destructive testing, issues of metrology and information and measuring equipment, systems engineering, software and computer measurements, the implementation of non-destructive testing in production.

For scientists, university teachers, post-graduate students, students and specialists in the field of non-destructive testing, metrology and information and measuring equipment.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України  
КВ № 23869-13709 Р від 14 лютого 2019 р.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електроенергетика та перетворювальна техніка» зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

**Офіційний сайт видання:** <http://samit.khpi.edu.ua/>

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### **Редакційна колегія**

*Відповідальний редактор:*

Сучков Г. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Радев Христо, д-р техн. наук., проф., Болгарія, Технічний університет, м. Софія

Тараненко Ю. К., д-р техн. проф., м. Дніпро, Україна

Щапов П.Ф., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Хорощайло Ю. С., к.т.н. проф., ХНУРЕ, Україна м. Харків

Клименко Б.В. д-р техн. наук проф., НТУ «ХПІ», Україна

Петрищев О. М., д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

Стоєв П.І. д-р ф.-мат. наук, проф., ХФПІ, м. Харків, Україна

Смолін Ю.О. к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна,

Плеснецов С.Ю., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Григоренко С.М., к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ноздрачова К.Л. к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», Україна

#### **Editorial staff**

*Associate editor:*

Suchkov G. M., Prof., NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Radev Hristo, Dr. Tech. Sciences, Prof., Bulgaria, Technical University, Sofia

Taranenko Yu. K., Dr. Tech. Sciences, Prof., Dnipro, Ukraine

Shchapov PF, Doctor of Technical Sciences, NTU "KhPI", Ukraine

Khoroshailo Yu. Ye., Ph.D. Prof., KhNURE, Ukraine, Kharkiv

Klimenko B. V., Dr. of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Petrishchev OM, Ph.D., Prof. NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine

Stoiev P.I., Dr. Phys.-Math. Sciences, Professor, KhPhT, Kharkiv, Ukraine

Smolin Yu.O. Ph.D., Associate Professor, NTU "KhPI", Ukraine,

Plesnetsov S.Yu., Ph.D., Associate Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Grigorenko S.M., Ph.D., Associate Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Nozdrachova K.L., Ph.D., Associate Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 11 від 27 грудня 2019 р.

УДК 620.179

**Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, О. В. ТАЛКО, Л. О. ТЕСЛЕНКО****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНАХ С ПОКРЫТИЕМ**

В работе представлены результаты решения задачи анализа возможности выявления дефекта в виде риски или царапины малой глубины, которые находятся под покрытием на поверхности металла. Задача имеет практическое значение при входном контроле лопастей винтов вертолёта. Для её решения был поставлен измерительный эксперимент. В результате его показано, что царапина глубиной 0,4 мм может быть обнаружена при условии использования поверхностных акустических волн, параметры которых адаптированы к особенностям формирования акустического поля в объекте контроля. Критерии выявления дефекта могут быть основаны на энергетическом, временном или частотном принципах.

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, слоистые материалы, дефекты, неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, импульсное зондирование.

**Ю. Г. БЕЗЫМЯННИЙ, О. В. ТАЛКО, Л. О. ТЕСЛЕНКО****ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ  
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ПЛАСТИНАХ З ПОКРИТТЯМ**

В роботі представлені результати рішення задачі аналізу можливості виявлення дефекту у вигляді риски або подряпини малої глибини, які знаходяться під покриттям на поверхні металу. Задача має практичне значення під час вхідного контролю лопатей гвинтів гелікоптера. З метою її вирішення здійснено вимірювальний експеримент. Показано, що подряпина глибиною 0,4 мм може бути виявлена за умови використання поверхневих акустичних хвиль, параметри яких адаптовані до особливостей формування акустичного поля в об'єкті контролю. Критерії виявлення дефекту можуть базуватися на енергетичному, часовому або частотному принципах.

**Ключові слова:** поверхневі акустичні хвилі, шаруваті матеріали, дефекти, неруйнівний контроль, ультразвукові методи, імпульсне зондування.

**YU. G. BEZIMYANNIY, O. V. TALKO, L. O. TESLENKO****THE USE OF SURFACE ACOUSTIC WAVES FOR DEFECT DETECTION IN COATED PLATES**

The work represents the results of solving the task to analysis possibilities of detecting a defect in the form of a line or a scratch of little depth, which are situated under the coating on metal surface. The task has a practical importance at input control of a helicopter screw blade. A measuring experiment was performed to solve the task. It has been shown that a scratch of 0.4 mm depth can be detected subject to the use of surface acoustic waves, parameters of which are adapted to the peculiarities of acoustic field formation in the object under control. Criteria of defect detection can be based on energy, time or frequency principles. The further development of the work implies the conduction of the experiment directly on the spar. In this case a special attention should be paid to providing the possibility of sounding an item with surface acoustic waves in the conditions of a real coating. Practical realization of the developed method on a real item implies the creation of surface acoustic wave sensors with an input angle for certain material of the item, the choice and the realization of the most effective diagnostic parameter.

**Keywords:** surface acoustic waves, layered materials, defects, non-destructive testing, ultrasonic methods, pulse sounding.

**Введение.** Поверхностные акустические волны (ПАВ) были изучены и рекомендованы к применению ещё в середине прошлого века [1, 2]. Однако их широкое использование в неразрушающем контроле слоистых изделий не состоялось из-за сложности постановки и обработки результатов эксперимента, а также отсутствия промышленно изготавливаемых датчиков возбуждения-приёма волн такого типа [3]. В настоящее время, в связи с повышением научно-технического уровня обеспечения акустического эксперимента, снова наблюдается интерес к практическому применению волн Релея, Лемба, Лява при решении различных задач выявления локальных изменений состояния материалов [4–7]. В этих работах отмечается, что эффективность использования ПАВ при контроле изменения состояния материала связана с точностью постановки измерительного эксперимента и обработки его результатов.

При входном контроле лопастей несущего винта вертолёта на ремонтном заводе возникает задача выявления в лонжероне на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием одиночных дефектов в виде рисков или царапин глубиной более 0,25–0,3 мм [8]. Эти дефекты классифицируют как механические. Они

недопустимы для дальнейшей эксплуатации изделия, требуют выявления и устранения. Рекомендации по выявлению таких дефектов при наличии покрытий отсутствуют.

Литературные данные [1] позволяют предположить, что для решения указанной задачи могут быть использованы ПАВ, однако в [7] предупреждают, что на практике не всегда подтверждаются рекомендации литературы.

Лопать вертолёта – дорогостоящее изделие, поэтому изготовление из неё образцов для проведения поисковых экспериментов нецелесообразно. Проверку возможности решения рассматриваемой задачи можно провести с помощью измерительного эксперимента на модели реального объекта, позволяющей реализовать и учесть особенности формирования в нём акустического поля применяемой упругой волны.

**Цель исследования:** экспериментально, посредством ультразвукового неразрушающего контроля, показать возможность выявления одиночных дефектов в виде рисков или царапин глубиной более 0,3 мм на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием.

Для достижения поставленной цели применяли методологию обоснованного синтеза и оптимизации методов контроля [9], которая, в нашем случае, заключалась в решении следующих последовательных операций: анализ акустических особенностей объекта в условиях задачи контроля и выбор его адекватной физической модели; разработка акустической модели формирования ультразвукового поля в объекте контроля и требований к постановке эксперимента; разработка методики и проведение измерительного эксперимента; анализ полученных результатов; выводы.

**Акустические особенности объекта контроля и его физическая модель.** Для анализа был взят лонжерон несущего винта вертолёта Ми-8 [8]. Поперечное сечение лонжерона с вскрытым для визуального наблюдения и контроля дефектом в виде риски или царапины показаны на рис. 1.

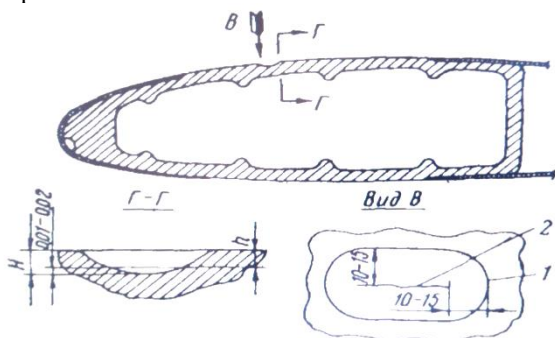


Рис. 1 – Вскрытая риска или царапина на поверхности металлической части лонжерона несущего винта вертолёта Ми-8 [8]

Как видно из рисунка, в месте возможного наличия дефекта лонжерон состоит из основы в виде слоя, наружная поверхность которого имеет незначительную кривизну, а внутренняя – усилена рёбрами жёсткости. На наружную поверхность слоя нанесен тонкий слой покрытия. Основа изготовлена из сплава алюминия, а покрытие – из резиноподобного материала.

Проблемами при выявлении указанных дефектов стандартными ультразвуковыми методами [10] являются: 1 – малые отражающая и рассеивающая способности дефекта, не позволяющие использовать объёмные упругие волны; 2 – наличие рёбер жёсткости, усложняющих акустическое поле в основе; 3, 4 – наличие покрытия, приводящее к изменению акустического поля за счёт появления системы основа-покрытие (3) и усложняющего доступ упругой волны к дефекту (4).

Для определения возможности прозвучивания основы лонжерона при наличии покрытия был поставлен пробный эксперимент, заключающийся в прозвучивании со стороны покрытия реального лонжерона с помощью ультразвукового толщиномера. В результате эксперимента на частоте 5 МГц был получен полноценный эхо-сигнал от внутренней поверхности лонжерона, свидетельствующий об акустической прозрачности покрытия. Поэтому, в соответствии с рекомендациями [1, 2], есть основания предполагать, что все указанные проблемы могут

быть решены путём использования ПАВ, распространяющихся вдоль основы лонжерона вблизи её внешней поверхности.

В качестве модели основы лонжерона был взят образец для исследований в виде элемента листа (180×19×5 мм) из используемого в самолётостроении алюминиевого сплава Д16Т. На поверхности образца была нанесена риска глубиной  $h_p=0,4$  мм. (рис. 2) Моделями покрытия служили: липкая лента толщиной 0,04 или изоляционная лента – 0,2 мм, наклеенные на образец со стороны покрытия.



Рис. 2 – Модель основы лонжерона с риской

Выбранный образец позволяет решать поставленную задачу в два этапа: первый – оптимизация вида и параметров акустического поля при оценке возможности выявления риски на его поверхности; второй – оценка возможности выявления риски при наличии покрытия.

**Акустическая модель эксперимента и требования к его постановке.** Использование ПАВ Рэлея позволяет сфокусировать энергию акустического поля вблизи поверхности изделия на глубине длины волны ( $\lambda_R$ ), тем самым увеличивая отражающую (рассеивающую) способности риски пропорционально волновому размеру её глубины [2], которые, в нашем случае (скорость распространения волн Рэлея  $c_R = 2,9$  км/с,  $h_p=0,4$  мм), достигнут максимума уже на частоте  $\approx 3$  МГц. Дальнейшее увеличение частоты приведёт к росту затухания упругой волны, что нежелательно при прохождении неметаллического покрытия [10]. Для формирования радиоимпульса на этой частоте его длительность должна быть не менее 2 мкс [11]. Дальнейшее увеличение длительности из-за реверберационных явлений может привести к усложнению структуры акустического поля в пластине [12], приведя к возможному маскированию дефекта.

ПАВ Рэлея возбуждается на поверхности среды, если из другой, граничащей с ней среды, на эту поверхность падает продольная упругая волна под углом, несколько большим второго критического, который, в случае падения из оргстекла на дуралюмин составляет  $70,6^\circ$  [10]. Поскольку состав дуралюмина может варьироваться, то и значение угла требует подстройки под реальный материал.

Таким образом, согласно рекомендациям литературы, акустический тракт для проведения эксперимента должен включать в себя электроакустические преобразователи с перестраиваемым углом ввода-снятия упругой волны  $\approx 70,6^\circ$ . Зондирование образца следует проводить радиоимпульсом с тональным заполнением на частоте  $\approx 3$  МГц и длительностью  $\approx 2$  мкс при необходимости подстройки указанных параметров. Выбор критериев выявления дефекта и их оптимизация связаны с возможностями подстройки параметров зондирования

и обработки сигнала в приёмном тракте. Желательно иметь возможности такой обработки по временному, энергетическому и частотному принципам.

**Аппаратура, методика, эксперимент.** Приведенным требованиям удовлетворяет разработанный нами аппаратный комплекс для прецизионных акустических измерений [13]. В его состав входят электроакустические преобразователи с переменным углом ввода [14] (рис. 3).



Рис. 3 – Электроакустические преобразователи с переменным углом ввода

Для получения ПАВ Рэлея преобразователи разместили на бездефектной части рабочей поверхности образца на расстоянии  $l=4$  мм между их торцами и провели настройку углов ввода таким образом, чтобы отсутствовали другие типы волн (рис. 4 а). Это позволило отстроиться от паразитных сигналов и их интерференционного взаимодействия.

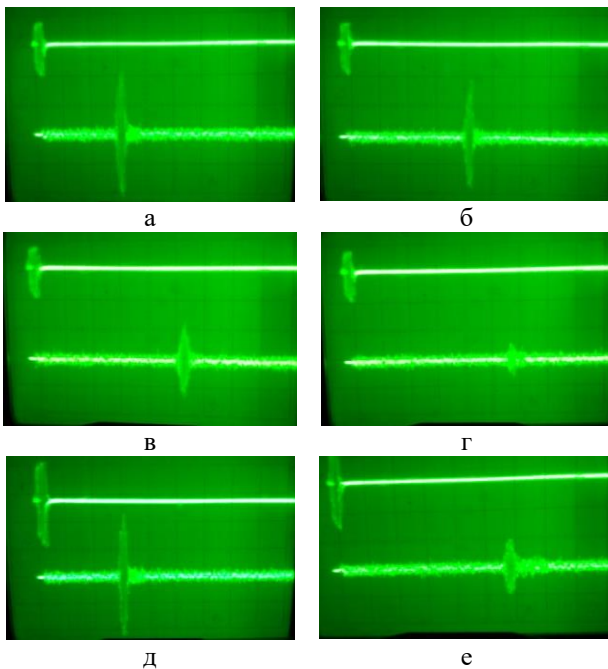


Рис. 4 – Осциллограммы сигналов ПАВ

При пошаговом увеличении  $l$  до 5,3 см амплитуда ПАВ убывала по известному [1] закону (рис. 4 б-в). Как только в зоне ПАВ появился дефект ( $l=6$  см), амплитуда сигнала резко упала (рис. 4 г), появились дополнительные составляющие, разнесенные во времени, изменился частотный спектр (рис. 5 б). При этом основная гармоника сместилась на 10 %. Последнее свидетельствует об изменении формы сигнала. Начиная с  $l=8,5$  мм, риска перестаёт влиять на формирование акустического сигнала и его вид, закономерности изменения амплитуды восстанавливаются.

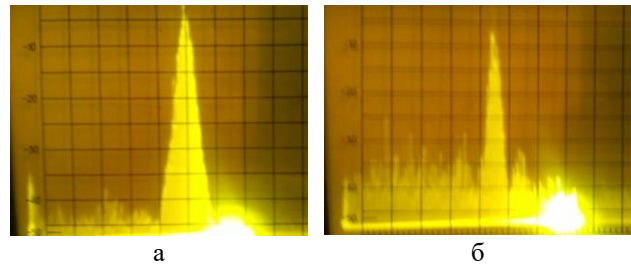


Рис. 5 – Спектрограммы сигналов ПАВ

Наличие покрытия (липкой ленты), после повышения уровня зондирующего сигнала и чувствительности приёмной аппаратуры, не существенно изменило характер полученных результатов (рис. 4 д, е).

При использовании в качестве покрытия изоляционной ленты возможности имеющейся в наличии аппаратуры не позволили обеспечить достаточный уровень зондирующего сигнала для формирования волны Рэлея.

Переход на частоту 1,5 МГц не позволил решить поставленную задачу даже при отсутствии покрытия.

Анализ полученных результатов. Результаты эксперимента показали принципиальную возможность выявления с помощью ПАВ Рэлея одиночных дефектов в виде рисок глубиной 0,4 мм на поверхности металлического слоя под неметаллическим покрытием. При этом:

- высокой эффективности использования ПАВ Рэлея, как и было отмечено в литературе, можно достичь только при условии адаптации их параметров к условиям поставленной задачи, в частности, точной настройки угла ввода электроакустических преобразователей на ПАВ;

- критериями выявления дефекта могут быть энергетические, частотные и временные параметры сигнала, его форма;

- важным фактором при выявлении дефекта является его расположение относительно приёмного преобразователя, что связано с конечными размерами зоны тени от дефекта;

- при наличии покрытия система должна обладать достаточной мощностью при зондировании и чувствительностью в приёме, чтобы обеспечить получение сигнала.

**Выводы.** В результате работы посредством измерительного эксперимента на модели лонжерона, имеющего дефект в виде риски глубиной 0,4 мм, несущего винта вертолёта показана принципиальная возможность выявления такого дефекта с помощью поверхностных акустических волн, параметры которых настроены на эффективное взаимодействие именно с этим видом дефекта.

Развитие работы может быть направлено на совершенствование измерительной аппаратуры для обеспечения надёжного контроля в условиях более толстого покрытия с последующим переходом к реальному объекту.

#### Список литературы

1. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966. – 168 с.

2. Викторов И. А. Звуковых поверхностные волны в твёрдых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
4. B. Lu. Study on Surface Stress Measurement of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating Based on Rayleigh Wave Signal Analysis // Advanced Materials Research, Vols. 399-401, P. 2177-2180, 2011.
5. Characterization of Local Residual Stress at Blade Surfaces by the V(z) Curve Technique/ Yanxun Xiang, Da Teng, Mingxi Deng, Yunze Li, Changjun Liu, Fujhen Xuan // Metals.– 2018, – 8 (8). – P. 651.
6. Edouard G. Love Surface Waves for Materials Evaluation // Nesvijski Civil Engineering Department University of Minnesota Minneapolis, MN 55455.
7. Generation Mechanism of Nonlinear Rayleigh Surface Waves for Randomly Distributed Surface Micro-Cracks /Xiangyan Ding, Feilong Li, Youxuan Zhao, Yongmei Xu, Ning Hu, Peng Cao and Mingxi Deng // Materials. – 2018 – 11 (4). – P. 644.
8. Вертолёт Ми-8. Инструкция по технической эксплуатации. Книга 1. Планер и силовая установка.
9. Безимьянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів 2007. № 4. С. 53-65.
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
11. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1971. – 672 с.
12. Безимьянный Ю. Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии // Современные проблемы физического материаловедения: Сб. науч. тр. Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Сер. "Фізико-хімічні основи технології порошкових матеріалів" – К., 2005. – С. 190–201.
13. Безимьянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6.
14. А.С. № 1010551 СССР Безимьянный Ю. Г., Гришаков С. В. Ультразвуковой искатель с переменным углом ввода. Заявка № 3355952 от 18.11.1981.
4. B. Lyu Study on Surface Stress Measurement of Laser Cladding Fe-Based Alloy Coating Based on Rayleigh Wave Signal Analysis, Advanced Materialy Research, Vols. 399-401, P. 2177-2180, 2011
5. Characterization of Local Residual Stress at Blade Surfaces by the V(z) Curve Technique/ Yanxun Xiang, Da Teng, Mingxi Deng, Yunze Li, Changjun Liu and Fujhen Xuan // Metals – 2018, – 8 (8). – P. 651
6. Edouard G. Love Surface Waves for Materials Evaluation // Nesvijski Civil Engineering Department University of Minnesota Minneapolis, MN 55455
7. Generation Mechanism of Nonlinear Rayleigh Surface Waves for Randomly Distributed Surface Micro-Cracks /Xiangyan Ding, Feilong Li, Youxuan Zhao, Yongmei Xu, Ning Hu, Peng Cao and Mingxi Deng // Materials. – 2018 – 11 (4). – S.644
8. Vertol'ot Mi-8. Instruksiya po tehničkoj ekspluatatsii. Kniga 1. Planer i silovaya ustanovka. [Helicopter of Mi– 8. Instruction on technical exploitation. Book 1. Glider and power-plant. ]
9. Bezmyannyy Yu. H. Akustychnyy kontrol' materialiv z rozvynutoyu mezostrukturoyu [Acoustic control of materials with developed mesostructure] // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv [Physical-chemical mechanics of materials] 2007. No 4. pp. 53-65.
10. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik [Non-destructive testing: Handbook]: V 8 t. / Rus. ed.: V. V. Klyuev. Vol. 3: I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. Ul'trazvukovoy kontrol' [Ultrasonic testing]. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
11. Gonorovskiy I. S. Radiotekhnicheskie tsepi i signalyi. [Radiotechnical chains and signals] Moscow: Sovetskoe radio, 1971. – 672 p.
12. Bezmyannyy Yu. G. Osobennosti akusticheskikh izmereniy pri impul'snom zondirovanii materialov, izgotovlyаемых metodami poroshkovoy metallurgii [Features of acoustic measurements for pulsed sounding of materials manufactured by methods of powder metallurgy] // Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya: Sb. nauch. tr. Instituta problem materialovedeniya im. I. N. Frantsevicha NAN Ukrainy [ Modern problems of physical materials science: Proc. of the Institute of Problems of Materials Science. I.N.F.]. Ser. "Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii poroshkovykh materialov" Modern problems of physical materialovedeniya [Collection of scientific works Institute of problems of m materialovedeniya the name of I.N.Frantsevicha of NAN of Ukraine. Ser. "Physical and chemical bases of technology of powder-like materials"] – Kiev. 2005. – pp. 190–201.
13. Bezmyannyy Yu. G. Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv poristykh materialov [Possibilities of acoustic methods at control of structure and физико-механических properties of porous materials]// Poroshkovaya metallurgiya. – 2001. – No 5/6.
14. A.S. N 1010551 SSSR Bezmyannyy Yu. G. Grishakov S. V. Ul'trazvukovoy iskatel s peremennym uglom vvoda. [Ultrasonic seeker with the variable corner of input] Zayavka N 3355952 ot 18.11.1981.

#### References (transliterated)

1. Viktorov I. A. Fizicheskie osnovy primeneniya ultrazvukovykh voln Releya i Lamba v tekhnike. [Physical bases of application of the ultrasonic Rayleigh and Lamb waves are in a technique]. – Moscow: Nauka, 1966. – 168 p.
2. Viktorov I. A. Zvukovykh poverkhnostnyye volny v tvYordyih telah. [Voice superficial waves in solids]– Moscow: Nauka, 1981. – 288 p/
3. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: Spravochnik. [Non-destructive control and diagnostics. Handbook] / Pod red. V. V. Klyueva. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 656 p.

Надійшла (received) 05.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Безимьянный Юрий Георгиевич (Безимьянный Юрий Георгиевич, Bezimyanniy Yuriy Georgievych)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ; e-mail: bezimyni@i.com.ua.

**Талько Оксана Вікторівна (Талько Оксана Вікторівна, Talko Oksana Viktorovna)** – молодший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ; тел.: (044) 205-79-69; e-mail: dep57@materials.kiev.ua

**Тесленко Людмила Олегівна (Тесленко Людмила Олегівна, Teslenko Lyudmila Olegovna)** – науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства

**Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ, А. М. ВИСОЦЬКИЙ, А. М. КОЛЕСНИКОВ, К. А. КОМАРОВ,  
В. А. НАЗАРЕНКО, В. П. СОЛНЦЕВ**

### **ОСОБЛИВОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗА ЗМІНОЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ МАТЕРІАЛУ ДО І ПІСЛЯ ПРОКАТКИ**

Розглянуто задачу забезпечення достовірності та інформативності контролю властивостей матеріалу за результатами ультразвукових вимірювань в зразках у вигляді товстих стрижнів, у яких змінюються геометричні розміри після прокатки. Задача виникає в порошковій металургії при відпрацюванні технології створення матеріалів із заданими властивостями, яка включає в себе на одній із стадій прокатку. На прикладі зразків зі сплавів алюмінію і заліза проведено аналіз закономірностей формування та зміни акустичного поля в цих зразках. Відзначено, що істотним фактором, який впливає на ці закономірності є ефект трансформації пружних хвиль на поверхні зразка. Не урахування цього ефекту може призвести до промахів при ультразвукових вимірюваннях і, як наслідок, – до недостовірності відображення динаміки змін властивостей матеріалу при зміні розмірів зразка. Для підвищення інформативності контролю необхідно адаптувати зондувальний сигнал і обробку приймального сигналу до особливостей формування акустичного поля.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, пружні хвилі, порошкові матеріали, товсті стрижні, прокатка, акустичне поле.

**Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ, А. Н. ВИСОЦЬКИЙ, А. Н. КОЛЕСНИКОВ, К. А. КОМАРОВ,  
В. А. НАЗАРЕНКО, В. П. СОЛНЦЕВ**

### **ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛА ДО И ПОСЛЕ ПРОКАТКИ**

Рассмотрена задача обеспечения достоверности и информативности контроля свойств материала по результатам ультразвуковых измерений в образцах в виде толстых стержней, в которых изменяются геометрические размеры после прокатки. Задача возникает в порошковой металлургии при отработке технологии создания материалов с заданными свойствами, включающей в себя на одной из стадий прокатку. На примере образцов из сплавов алюминия и железа проведен анализ закономерностей формирования и изменения акустического поля в таких образцах. Отмечено, что существенным фактором, влияющим на эти закономерности, является эффект трансформации упругих волн на поверхности образца. Не учёт этого эффекта может привести к промахам при ультразвуковых измерениях и, как следствие, – к неадекватности отображения динамики изменения свойств материала при изменении размеров образца. Для повышения информативности контроля необходимо адаптировать зондирующий сигнал и обработку приемного сигнала к особенностям формирования акустического поля.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, упругие волны, порошковые материалы, толстые стержни, прокатка, акустическое поле.

**Yu. G. BEZIMYANNIY, A. M. VYSOTSKY, A. M. KOLESNIKOV, K. A. KOMAROV, V. A. NAZARENKO,  
V. P. SOLNTSEV**

### **PECULIARITIES OF ULTRASONIC INSPECTION ON THE CHANGES IN THE PROPERTIES OF SAMPLE MATERIAL BEFORE AND AFTER ROLLING**

The problem of providing reliability and informativeness of inspection on the changes in material properties based on the ultrasonic measurements in the samples in the form of thick bars which change their geometric dimensions after rolling is considered. The problem appears in powder metallurgy in the course of developing the technology for creation of the material with given properties including rolling at one of the stages. As an example, the samples made from aluminum alloys and steel are taken and the peculiarities of formation and changes of acoustic field in such samples are analysed. It is noticed that the significant factor affecting the peculiarities is effect of elastic wave transformation on the sample surface. If the effect is not considered, measurement miss at ultrasonic measurements may appear and, as a result, inaccurate display of dynamics of material property changes with changing the sample dimensions may be obtained. To improve informativeness of inspection, it is necessary to adapt a probing signal and receiving signal processing to the peculiarities of acoustic field formation.

**Key words:** ultrasonic inspection, elastic waves, powder materials, thick bars, rolling, acoustic field.

**Вступ.** При розробці нових матеріалів, які виготовляють методами порошкової металургії, для забезпечення заданих властивостей у кінцевому виробі важливо правильно вибрати параметри технологічних режимів на різних стадіях обробки його напівфабрикатів. [1] У другій половині минулого сторіччя було поставлене питання про необхідність розробки неруйнівних ультразвукових (УЗ) методів, які дозволяють контролювати динаміку зміни властивостей порошкового матеріалу після кожної стадії. [2] Ефективне використання УЗ методів передбачає адаптацію їхніх параметрів до умов вимірювання, які можуть змінюватися в процесі виготовлення матеріалу. [3]

У порошковій металургії прокатка є типовою операцією тільки на стадії формування порошків [4], але в останні роки для отримання матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями її стали включати на стадії додаткової обробки

напівфабрикатів [5]. В результаті прокатки суттєво змінюються не тільки властивості матеріалу, але й геометричні розміри його зразків. [5] Останнє призводить до змін акустичного поля у зразку матеріалу і тому, при використанні типових методик УЗ вимірювань [6], може призвести до промахів визначення параметрів пружної хвилі і неадекватному відображенні динаміки зміни властивостей матеріалу в результаті прокатки. Проведений нами літературний пошук не виявив моделювання цього процесу, методики вимірювань чи будь-яких рекомендацій для отримання коректних результатів у таких випадках.

**Метою роботи** є розробка принципів ультразвукових вимірювань у зразках порошкових матеріалів до і після прокатки для забезпечення за їхніми результатами адекватного відображення динаміки зміни властивостей матеріалу.

Для досягнення поставленої мети застосовували методологію обґрунтованого синтезу й оптимізації



методів контролю [3], яка, у нашому випадку, полягала в розв'язанні наступних послідовних операцій: аналіз особливостей формування акустичного поля в об'єкті в умовах задачі контролю; розробка вимог до УЗ вимірювань; перевірка запропонованих рекомендацій на реальному об'єкті; аналіз отриманих результатів; висновки.

**Особливості формування акустичного поля в об'єкті контролю. Вимоги до ультразвукових вимірювань.** Відпрацювання технології виготовлення нових матеріалів з використанням прокатки проводять на зразках у вигляді товстих стрижнів з прямокутним перетином (див. рис. 1) [5].

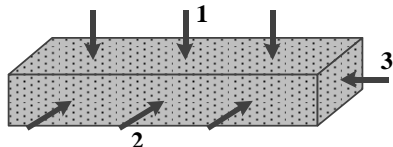


Рис. 1 – Форма зразків для досліджень та напрямів їх прозвучування

Зв'язок характеристик пружних хвиль (швидкість поширення та коефіцієнт згасання) з властивостями порошкових матеріалу (характеристики пружності, непружності, пористість, дефектність, ступінь анізотропії, нерівномірність розподілу властивостей за об'ємом, тощо) наданий у [3]. Прозвучування зразка у різних напрямках (рис. 1) різними пружними хвилями дає можливість отримати комплексну інформацію про матеріал [7].

За допомогою апаратного комплексу для прецизійних акустичних вимірювань [8] було проведено дослідження акустичних полів (див. рис. 2), сформованих за різними напрямками таких зразків у матеріалах із сталі та дюралюмінію (див. табл. 1) при їхньому зондуванні періодичним імпульсом поздовжніх пружних хвиль тривалістю 1 мкс та заповненням частотою 4 МГц. Вибір тривалості імпульсу дає можливість розділити важливі елементи акустичного поля, а частота – сформувати радіоімпульс із вузькою смугою частот.

Таблиця 1 – Дослідження акустичних полів, сформованих за різними напрямками зразків

№	Зразок			$h/\lambda_1$	$t/T_1$	Рис. 2
	Матеріал	Розміри, мм	Напрямок			
1	дюралюміній	97 x 25 x 5	1, 2, 3	3,2	5,7	а, б, в
2	дюралюміній	48 x 25 x 5	3	3,2	5,7	г
3	дюралюміній	27 x 25 x 5	3	3,2	5,7	д
4	сталь	56 x 25 x 5	3	3,5	5,3	е
5	сталь	45 x 25 x 10	3	7,0	10,6	є
6	сталь	100 x 20 x 3,5	3	2,5	3,7	ж

За результатами аналізу наведених осцилограм можна сказати наступне.

За напрямом 1 (див. рис. 2 а) акустичне поле формується поздовжніми пружними хвилями, які багаторазово відбиваються від верхньої та нижньої поверхонь зразка. Вимірювання відстані у часі між сусідніми імпульсами дає змогу визначити за відомими методиками [6] швидкість поширення

поздовжньої пружної хвилі ( $V_1$ ), а вимірювання зменшення амплітуди – згасання ( $\alpha_1$ ).

За напрямом 3 (див. рис. 2 в) акустичне поле формується пружними хвилями, які трансформуються на верхній і нижній поверхнях з поздовжньої у поперечну та навпаки [9]. При цьому перший імпульс відповідає поздовжній хвилі, яка пройшла зразок наскрізь, а кожний наступний імпульс затримується на величину [10]

$$t = T_1 \cdot [(V_1/V_2)^2 - 1]^{1/2} \cdot h/\lambda_1$$

де  $h$  – товщина зразка;

$T_1$  – період коливань поздовжньої пружної хвилі;

$V_1$  та  $V_2$  – швидкості поширення поздовжньої та поперечної пружних хвиль;

$\lambda_1$  – довжина поздовжньої пружної хвилі.

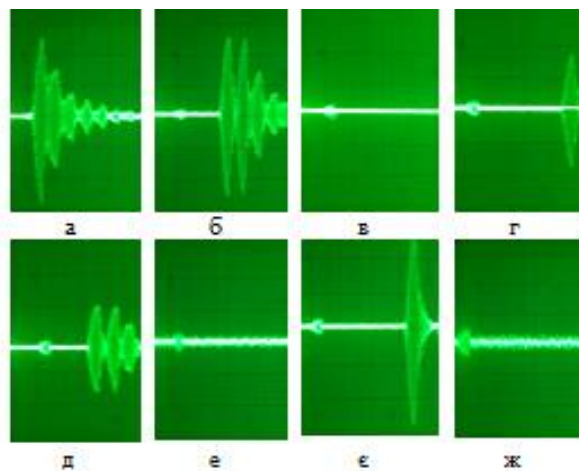


Рис. 2 – Осцилограми акустичних полів у зразках відповідно табл. 1

При трансформації хвиль на всій довжині зразка проходить перекачування енергії з першого імпульсу у другий, з другого у третій і т.д. Тому з відстанню неперервно, аж до самого нуля, зменшується амплітуда першого імпульсу та зростає наступних (див. рис. 2 д, г, в), що не дає змоги визначити  $V_1$  за відомими методиками [6]. Вимірювання згасання за амплітудами сигналів втрачає сенс. Значення  $t$  не змінюється при різних довжинах зразків, тому, відповідно наведеній формулі, з'являється можливість додаткового визначення  $V_2$  за результатами вимірювання  $t$ .

За напрямом 2 (див. рис. 2 б) діють обидва вказаних вище механізми формування акустичного поля. Видно, що, після першого відбиття, амплітуда першого імпульсу суттєво зменшується, а, після другого практично зникає. Тут за спеціальними методиками можна визначити  $V_1$  і  $V_2$  та нема сенсу –  $\alpha_1$ .

Розглянемо особливості формування акустичного поля за механізмом трансформації. З наведеної вище формули видно, що на цей процес впливають: стала величина для даного матеріалу, пов'язана з його властивостями (складова у [...], яка дорівнює 1,77 для дюралюмінію та 1,51 – для сталі); хвилевий розмір висоти зразка ( $h/\lambda_1$ ) та параметр зондувального сигналу ( $T_1$ ).



Дійсно, з рис. 2 в та є бачимо, що в сталі процес трансформації хвиль проходить швидше.

Вплив хвильового розміру показано на рис. 2 ж. Збільшення хвильового розміру призводить до суттєвого зростання  $t_t$  порівняно з  $T_1$  (див. табл. 1). Для вибраних параметрів зондувального сигналу виокремлення сусідніх імпульсів можливе за умов  $t_t/T_1 \geq 4$ . Це видно з рис. 2 ж, де кінці імпульсів накладаються вже при  $t_t/T_1=3,7$ , але самі імпульси ще розрізняються за максимальними амплітудами. При подальшому зменшенні  $t_t/T_1$  поздовжня пружна хвиля в напрямках 2 та 3 перероджуються в нульову симетричну хвилю із швидкістю поширення  $V_L$ , яка вимірюється за іншою методикою Лемба [9] та має інший зв'язок із властивостями матеріалу [6].

Відповідно до визначених особливостей формування акустичних полів у зразках у вигляді товстих стрижнів з прямокутним перетином слід надати такі рекомендації для отримання за результатами УЗ вимірювань комплексної інформації про динаміку зміни властивостей матеріалу до і після прокатки зразка:

– для отримання максимальної інформації про матеріал необхідно провести до і після прокатки прозвучування його зразка у всіх напрямках (див. рис. 1), вибравши параметри зондувального сигналу такі, щоб забезпечити виокремлення інформативних імпульсів акустичного поля для визначення  $V_1$ ,  $V_t$  та  $\alpha$ ;

– зміна товщини зразка в результаті прокатки за зменшення першого імпульсу може привести до промахів при вимірюванні часу приходу поздовжньої хвилі за напрямками 2 та 3 на  $T_1$  чи, навіть,  $t_t$ . При неможливості у прийнятному тракті виявлення на фоні перешкод першого періоду, чи усього першого імпульсу, для усунення промахів необхідно врахувати це при визначенні  $V_1$ ;

– якщо за напрямками 2 чи 3 неможливо визначити  $V_1$ , треба перейти до визначення  $V_L$  із відповідним врахуванням властивостей матеріалу для адекватного відображення їхніх змін в результаті прокатки.

**Визначення впливу прокатки на швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у порошковому матеріалі.** Розроблені рекомендації було використано для дослідження динаміки змін властивостей порошкового матеріалу 73Ni-20Cr-6Al-1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в результаті прокатки. До прокатки зразок мав розміри 49,7x8,3x4,7, а після – 54,6x9,0x3,6 мм. Акустичне поле дозволяло вимірювати  $V_1$  за всіма напрямками (див. рис. 1) та  $V_t$  – за напрямком 1. Вимірювання та відповідні розрахунки показали, що після прокатки змінилася (на 9 %) тільки  $V_1$  за напрямком 3. Усі інші характеристики акустичного поля залишилися незмінними. Отриманий результат пояснюється появою текстури в матеріалі зразка після прокатки.

**Висновки.** В результаті дослідження особливостей формування акустичного поля в різних напрямках зразка у вигляді товстого стрижня з прямокутним перетином показано, що ультразвукові

вимірювання забезпечують адекватне відображення змін властивостей матеріалу в результаті прокатки лише за умови врахування при виборі параметрів зондувального та методики обробки прийнятого сигналів впливу механізму трансформації пружних хвиль на поверхні зразка. Неврахування цього впливу може привести до суттєвих промахів при вимірюванні характеристик акустичних полів і, як результат, некоректному відображенню змін властивостей матеріалу після пресування.

#### Список літератури

1. Степанчук А. Н. Порошковая металлургия. // Неорганическое материаловедение энциклопедич. изд. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода в 2-х т. – Т.2. – Кн.2. -2008 – С.104–114.
2. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. Минск: Высшая школа, 1989. – 182 с.
3. Безмянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів 2007. № 4. – С.53–65.
4. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов в 2-х т.– Киев. Наукова думка. – 2012. – 569 с.
5. Solntsev V. Development of rolling modes for samples made from nichrome powder alloy and their testing at operating temperatures [Текст] / V. Solntsev, G. Frolov, L. Kravchuk, V. Nazarenko, I. Bilan, K. Petrash, I. Husarova, F. Potapov // International scientific journal "Machines. Technologies material". – Sofia. – 2017. – P. 254–257.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.
7. Безмянный Ю. Г., Козирацкий Е. А., Бродниковский Н. П., Талько О. В. Акустический неразрушающий контроль многокомпонентного сплава на основе ниобия // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. Прилади та методи контролю та визначення складу речовин. – 2015. – № 19. – С. 119–126.
8. Безмянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6.
9. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М., Машиностроение, 1981. 240 с.
10. Безмянный Ю. Г., Вдовиченко А. В., Кузьменко В. А. Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии: Препринт – Киев: ИПМ НАНУ, 1994. – 63 с.

#### References (transliterated)

1. Stepanchuk A. N. Poroshkovaya metallurgiya // Neorganicheskoe materialovedenie enciklopedich.izd / Pod red. G. G. Gnesina, V. V. Skorohoda v 2-h t. – Kn.2. – 2008 – PP.104-114.
2. Roman O V., Skorohod V. V., Fridman G. R. Ul'trazvukovoy I rezistometricheskii kontrol' v poroshkovoy metallurgii [Ultrasonic and resistometric control in powder metallurgy]. Minsk, Vyssh. Sc., 1989, 182 p.
3. Bezmyannyu Yu. N. Akustychnyy kontrol' materialiv z rozvnutoyu mezostrukuroyu [Acoustic control of materials with developed mesostructure] // Fizyko-khimichna mekhanika materialiv [Physical-chemical mechanics of materials] 2007. No 4. P. 53–65.
4. Kostornov A. G. Materialovedenie dispersnyh i poristyh metallov i spлавov v 2-ht. – Kiev, Naukova dumka – 2012. – 569 p.
5. Solntsev V. Development of rolling modes for samples made from nichrome powder alloy and their testing at operating temperatures [Текст] / V. Solntsev, G. Frolov, L. Kravchuk, V. Nazarenko, I. Bilan, K. Petrash, I. Husarova, F. Potapov // International scientific journal "Machines. Technologies material". – Sofia. – 2017. – P. 254–257.
6. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik [Nondestructive testing: guide]: In 8 volumes / Ed. V. V. Klyuev. Vol. 3: I. N. Ermolov,

- Yu. V. Lange. Ultrazvukovoy control [Ultrasonic testing]. – 2nd ed., fixed. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 864 p.
7. Bezimyannyu Yu. G., Kozirackiy E. A., Brodnikovskiy N. P., Talko O. V. Akusticheskiy nerazrushauschiy kontrol mnogokomponentnogo splava na osnove niobiya / // Visnyk Nacionalnogo tehnicnogo universitetu "HPF". Seriya : Elektroenergetyka ta peretvoruvalna tehnika Prylady ta metody kontroly ta vyznachennya skladu rehovyn. – 2015 – No 19 – pp. 119–126.
8. Bezymyannyiy Yu.G. Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mehaniceskikh svoystv poristyih materialov [Possibilities of acoustic methods at control of structure and физико-механических properties of porous materials]// Poroshkovaya metallurgiya. – 2001.– No 5/6.
9. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 240 p.
10. Bezimyannyu Yu. G., Vdovichenko A. V., Kuzmenko V. A. Nekotorye rezultaty akusticheskikh issledovaniy materialov, izgotovlyаемых metodami poroshkovoy metallurgii. Preprint – Kiev: IPM NANU, 1994. – 63 p.

Надійшла (received) 05.09.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Безимяний Юрій Георгійович (Безимянный Юрий Георгиевич, Bezimyanny Yuriy Georgievich)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувачий лабораторією, ІПМ НАНУ; м. Київ, Україна; e-mail: bezimyni@gmail.com

**Висоцький Андрій Миколайович (Висоцкий Андрей Николаевич, Vysotskiy Andriy Mykolayovych)** – головний технолог, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: driver5@ukr.net

**Колесников Анатолій Миколайович (Колесников Анатолий Николаевич, Kolesnikov Anatoliy Mykolayovych)** – науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: semafor@ukr.net

**Комаров Костянтин Андрійович (Комаров Константин Андреевич, Komarov Kostyantyn Andriyovych)** – науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: ko17con@gmail.com

**Назаренко Володимир Андрійович (Назаренко Владимир Андреевич, Nazarenko Volodymyr Andriyovych)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: vanazarenko@gmail.com

**Солнцев Віктор Петрович (Солнцев Виктор Петрович, Solntsev Viktor Petrovych)** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, ІПМ НАНУ, м. Київ, Україна; e-mail: bezimyni@gmail.com

УДК 621.179.16

*М. Г. БУРМА, В. Ф. РОЙ, В. О. ГРИНІНА***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКІВ**

УЗ хвиля в кристалі, який проводить, взаємодіє з квазічастками, що призводить до її затухання і зміни швидкості звуку. Вимірювання декременту затухання і швидкості розповсюдження ВЧ пружних коливань в широкому діапазоні частот при різних поляризація хвиль дає змогу отримати інформацію про взаємодію елементарних збуджень квазічастинок в твердотільній плазмі з монохроматичними фононами (тепловими коливаннями). Пропонується експериментальна установка для дослідження електронних і електромагнітних властивостей провідникових матеріалах методами ультразвукової спектроскопії. Особливістю установки є запропонований спосіб генерування ультракоротких ультразвукових імпульсів, що суттєво підвищує роздільну здатність та чутливість експериментальних досліджень шляхом виключення так званих «мертвих зон». Вона являє собою автоматично балансує мостову схему, в одно з пліч якої ввімкнена акустична лінія затримки з датчиками повздовжнього або поперечного звуку, досліджуваний зразок і приймальний датчик ультразвуку. Амплітуда, фаза та швидкість проходження сигналу через зразок, вимірюється шляхом порівняння з амплітудою і фазою опорного сигналу опорного каналу порівняння, який сформований в другому плечі мостової схеми.

Установка дає змогу досліджувати електрофізичні характеристики провідникових матеріалів в широкому діапазоні частот ультразвуку, температур і магнітних полів в автоматичному режимі, застосовуючи сучасні комп'ютерні технології отримання та обробки інформації.

**Ключові слова:** мостова схема, ультразвукова спектроскопія, електронні властивості провідників, амплітуда, фаза, декремент затухання, швидкість ультразвукової хвилі, енергетичний спектр носіїв заряду, твердотільна плазма.

*Н. Г. БУРМА, В. Ф. РОЙ, В. О. ГРИНІНА***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВ**

УЗ волна в проводящем кристалле взаимодействует с квазичастицы, что приводит к ее затуханию и изменению скорости звука. Измерения декремента затухания и скорости распространения ВЧ упругих колебаний в широком диапазоне частот при различных поляризации волн позволяет получить информацию о взаимодействии элементарных возбудений квазичастиц в твердотельной плазме с монохроматическими фононами (тепловыми колебаниями). Предлагается экспериментальная установка для исследования электронных и электромагнитных свойств проводящих материалах методами ультразвуковой спектроскопии. Особенностью установки является предложенный способ генерирования ультракоротких ультразвуковых импульсов, что существенно повышает разрешение и чувствительность экспериментальных исследований путем исключения так называемых «мертвых зон». Она представляет собой автоматически балансирующую мостовую схему, в одно из плеч которой включена акустическая линия задержки с датчиками продольного или поперечного звука, исследуемый образец и приемный датчик ультразвука. Амплитуда, фаза и скорость прохождения сигнала через образец, измеряется путем сравнения с амплитудой и фазой опорного сигнала опорного канала сравнения, который сформирован во втором плече мостовой схемы.

Установка позволяет исследовать электрофизические характеристики проводниковых материалов в широком диапазоне частот ультразвуку, температур и магнитных полей в автоматическом режиме, применяя современные компьютерные технологии получения и обработки информации.

**Ключевые слова:** мостовая схема, ультразвуковая спектроскопия, электронные свойства проводников, амплитуда, фаза, декремент затухания, скорость ультразвуковой волны, энергетический спектр носителей заряда, твердотельная плазма.

*N. G. BURMA, V. F. ROY, V. O. GRININA***EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR RESEARCH OF ELECTRON PROPERTIES OF CONDUCTORS**

An ultrasound wave in a conducting crystal interacts with a quasiparticle, which leads to its attenuation and a change in the speed of sound. Measurements of the attenuation decrement and the propagation velocity of HF elastic vibrations in a wide frequency range at different wave polarizations provide information on the interaction of elementary excitations of quasiparticles in a solid-state plasma with monochromatic phonons (thermal vibrations). An experimental setup is proposed for studying the electronic and electromagnetic properties of conductive materials by ultrasonic spectroscopy. A feature of the setup is the proposed method for generating ultrashort ultrasonic pulses, which significantly increases the resolution and sensitivity of experimental studies by eliminating the so-called "dead zones". It is an automatically balancing bridge circuit, one of the arms of which includes an acoustic delay line with longitudinal or transverse sound sensors, a test sample and an ultrasound receiving sensor. The amplitude, phase and speed of the signal passing through the sample is measured by comparing with the amplitude and phase of the reference signal of the reference comparison channel, which is formed in the second arm of the bridge circuit.

The setup allows you to study the electrophysical characteristics of conductive materials in a wide range of ultrasound frequencies, temperatures and magnetic fields in automatic mode, using modern computer technology for obtaining and processing information.

**Keywords:** bridge circuit, ultrasonic spectroscopy, electronic properties of conductors, amplitude, phase, attenuation decrement, ultrasonic wave velocity, energy spectrum of charge carriers, solid-state plasma.

**Вступ.** Розповсюдження пружних хвиль в різноманітних провідникових матеріалах супроводжується дисипацією енергії, обумовленої процесами обміну її з носіями заряду, теплопровідністю, внутрішнього тертя або в'язкості і значною мірою визначаються фізичними властивостями самих матеріалів. Це дає змогу вивчати взаємодію пружних хвиль з плазмою твердих тіл в якості ефективного інструмента дослідження їх фундаментальних електрофізичних характеристик: структури енергетичного спектра, механізмів електрон-фононної взаємодії, деформаційного потенціалу, ангармонізму міжатомних сил і т.п., так і в плані прикладного використання електродинамічних ефектів, які супроводжують розповсюдження цих хвиль в динамічному нелінійному провідному середовищі [1, 2]. Найбільш інформативними з цієї точки зору є магнето-акустичні методи дослідження, коли носії ефективно проявляють свої динамічні властивості, які безпосередньо визначаються особливостями поверхонь Фермі даних провідникових матеріалів.

При розповсюдженні ультразвукових хвиль в провідниковому середовищі, спостерігається ряд електродинамічних ефектів, таких як дифракція, затухання, підсилення та генерація деяких типів хвиль, фізична природа яких обумовлена різними механізмами взаємодії їх з носіями заряду в напівпровідниках і металах, в яких електронні або «діркові» потоки можна створювати за допомогою зовнішніх полів, хвиль або градієнтів концентрації чи температури. В магнітному полі, спостерігається ряд резонансних ефектів, які отримали назву магнітоакустичних осциляцій, що виникають, якщо характерний розмір траєкторії електрона в магнітному полі кратний просторовому періоду звукової хвилі [3, 4]. Існування чисельних магнітоакустичних осциляцій пов'язане з великою кількістю різноманітних механізмів відбору електронів в провідниках, які ефективно обмінюються енергією зі звуковою хвилею. По результатам вимірювання періодів осциляцій вираховують ефективні перерізи поверхонь постійної енергії носіїв струму (поверхні Фермі) в провідниках, коефіцієнти деформаційної взаємодії та інші параметри. Багаторічна практика таких досліджень довела що ця методика є найбільш ефективним інформаційним методом вивчення широкого спектру електрофізичних властивостей провідникових матеріалів.

Інтенсивний розвиток акустичних методів у фізиці твердого тіла привів до крупних досягнень як в галузі вивчення фундаментальних властивостей структури твердих тіл, так і в плані прикладного використання отриманих результатів в різноманітних технічних пристроях.

У Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І.Веркина розроблена і ефективно використовується універсальна експериментальна установка, для вимірювання швидкості звуку та декременту затухання ультразвукових хвиль в провідниках, зсуву фаз, амплітуди та періоду

магнітоакустичних осциляцій, що дає змогу вивчати електрофізичні властивості металів та напівпровідників в широкому діапазоні частот ультразвуку, температур і магнітних полів.

Існуючі дослідні установки, що використовуються в практиці ультразвукової спектроскопії, засновані на способі генерації коротких ультразвукових імпульсів шляхом збудження датчиків ультразвуку електромагнітним сигналом високої частоти, що дозволяє генерувати імпульси, тривалість переднього і заднього фронтів яких складає величину порядку  $(\Delta f)^{-1}$ , де  $\Delta f$  – полюса пропускання датчика ультразвуку. Внаслідок цього, передній і задній фронти імпульсу, завдяки перехідним коливальним процесам, мають значну тривалість в часі і при проведенні дослідження структури і властивостей такими сигналами утворюють так звану “мертву зону”, в межах якої не має можливості отримати якісну картину процесів, що відбуваються в досліджуваному зразку.

Запропонований в установці спосіб генерації коротких ультразвукових імпульсів шляхом ударного збудження датчика ультразвуку високочастотними електромагнітними імпульсами порядку напівперіоду електромагнітного сигналу збуджуючої частоти, лише частково вирішує цю проблему. Недоліком такого способу є те, що при цьому тривалість заднього фронту ультразвукового імпульсу завдяки перехідним коливальним процесам залишається достатньо значною (порядку 10 нс), що обмежує роздільну здатність та вимірювальну спроможність даної установи, оскільки не усуває проблему виникнення “мертвих зон”, в межах якої “тонкі” ефекти в структурі досліджуваних матеріалів не можуть бути виявлені [5, 6, 7].

**Основна частина.** Метою даної роботи є створення вимірювальної установки для дослідження електронних і електромагнітних властивостей провідникових матеріалів методами ультразвукової спектроскопії, в якій здійснюється генерація ультракоротких ультразвукових імпульсів з короткими переднім і заднім фронтами, що значно підвищує роздільну здатність, вимірювальну спроможність та якість дослідження різноманітних матеріалів ультразвуковими методами, зокрема, завдяки повному виключенню явища “мертвих зон”.

Поставлена задача генерування ультракоротких ультразвукових імпульсів вимірювальною установкою вирішується тим, що до датчика ультразвуку подається прямокутний електромагнітний імпульс (меандр), під дією якого відбувається подвійне ударне збудження датчика ультразвуку переднім і заднім фронтами прямокутного імпульсу, в результаті чого ультразвуковий імпульс, який збуджується заднім фронтом прямокутного електромагнітного імпульсу, при умові, що тривалість його складає величину  $nT$ , (де  $T$  – період коливачь частоти збудження,  $n$  – ціле число) накладається в протифазі на перехідні коливальні процеси від переднього фронту і відбувається внаслідок цього їх повна компенсація.

Таким чином, регулюванням тривалості прямокутного електромагнітного імпульсу з метою досягнення повної компенсації перехідних коливальних процесів переднього і заднього фронтів ультразвукового імпульсу, дозволяє сформувати ультракороткі ультразвукові імпульси з надзвичайно коротким переднім і заднім фронтами тривалістю порядку декілька періодів високочастотних коливаний (наприклад, для найбільш застосованих в практиці ультразвукових досліджень робочих частот  $100\text{кГц} \div 3\text{МГц}$ , тривалість генерованих ультразвукових імпульсів складе  $0,2 \div 10\text{мкс}$ , що на порядок менше, ніж при існуючих способах генерції і позбавляє, таким чином, при дослідженні матеріалів утворення “мертвих зон”, в межах яких дрібні дефекти в структурі матеріалів не можуть бути виявлені.

Наведений рисунок 1 пояснює процес формування ультракороткого ультразвукового імпульсу, який відбувається наступним чином. При подачі на ультразвуковий датчик прямокутного електромагнітного імпульсу (меандру) 1 переднім його фронтом здійснюється ударне збудження ультразвукових коливаний 2 амплітудою

$\Delta E_1 \cdot e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau}} \cdot e^{-(i\bar{\omega} + \alpha)t}$  (де  $E_1$  – напруга електромагнітного сигналу;  $t$  – час;  $\Delta t_1$  – тривалість переднього фронту ультразвукового імпульсу;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  – частота електромагнітних коливаний;  $T$  – період коливаний;  $\alpha$  – коефіцієнт затухання ударно-збуджених коливаний). При цьому через час  $nT$  заднім фронтом прямокутного електромагнітного імпульсу 1 повторно ударно збуджуються коливання 3 датчика

ультразвуку амплітудою  $-\Delta E_2 \cdot e^{-\frac{\Delta t_2}{\tau}} \cdot e^{-(i\bar{\omega} + \alpha)t}$  (де  $\Delta E_2$  – амплітуда ультразвукових коливаний збуджених заднім фронтом електромагнітного імпульсу;  $\Delta t_2$  – тривалість заднього фронту імпульсу).

При тривалості  $\tau$  прямокутного електромагнітного імпульсу 1 такою, щоб фаза збуджених його заднім фронтом перехідних коливальних процесів в датчику ультразвуку була протилежною фазі коливаний, збуджених переднім фронтом, то відбувається практично повна компенсація перехідних процесів переднього і заднього фронтів і формується ультразвуковий імпульс 4 з коротким переднім і заднім фронтами (порядку декілька періодів коливаний високочастотної напруги).

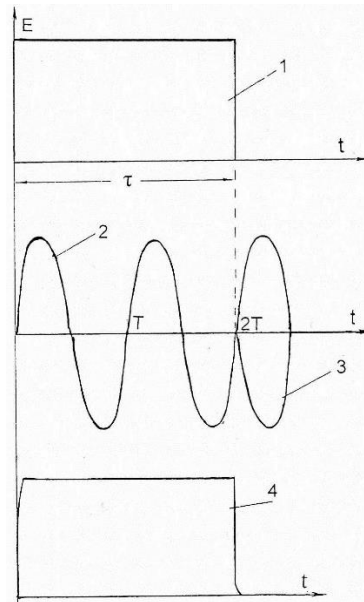


Рис. 1 – Епюри послідовності формування ультразвукового імпульсу

1 – меандр; 2 – ударно-збуджені коливання датчика ультразвуку переднім фронтом меандру; 3 – ударно-збуджені коливання, збуджені заднім фронтом меандру; 4 – сформований ультразвуковий імпульс.

Таким чином, запропонований спосіб забезпечує генерацію ультракоротких ультразвукових імпульсів з короткими переднім і заднім фронтами в діапазоні  $0,2 \div 10\text{ мкс}$ , що дозволяє підвищити роздільну здатність та вимірювальну спроможність установки ультразвукового дослідження структури та електронних властивостей матеріалів завдяки повного виключення явища “мертвих зон”, що дозволяє виявити найбільш тонкі ефекти в структурі матеріалів.

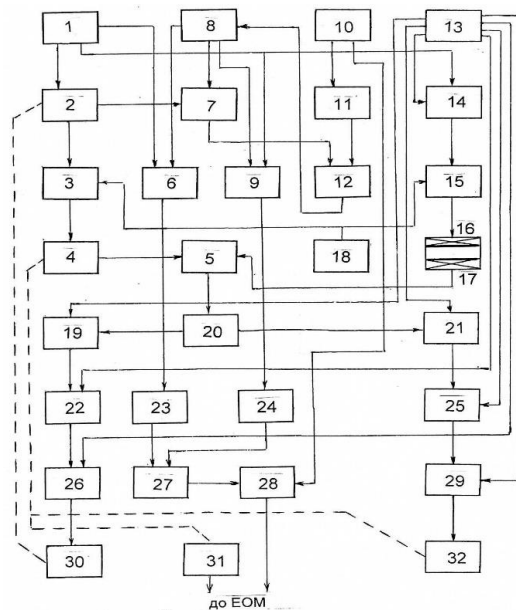


Рис. 2 – Блок-схема експериментальної установки

Наведена блок-схема (рис.2) пояснює особливості функціонування даної виміральної установки. Схема установки, містить послідовно з'єднані генератор синусоїдальних коливань 1, фазозсувник 2, перший підсилювач сигналу 3, атенюатор 4, вихід якого з'єднаний з входом приймача 5, вихід якого з'єднано з амплітудним детектором 20, виходи якого з'єднано з першим 19 і другим 21 електронними ключами, вихід першого ключа з'єднано з синхронним детектором 22, вихід якого приєднано до входу фазового детектора 26, а вихід фазового детектора приєднаний до реверсивного двигуна 30, механічно зв'язаного з фазозсувником 2, причому другий вихід генератора синусоїдальних коливань 1 зв'язано з входом модулятора фази 14, вихід якого з'єднано з другим підсилювачем сигналу 15, вихід якого з'єднано з випромінюючим датчиком ультразвуку 16, приєднаним до досліджуваного зразка, до другого кінця якого приєднано приймальний датчик ультразвуку 17, вихід якого з'єднано з другим входом приймача 5, вихід якого з'єднано з амплітудним детектором 20, другий вихід якого з'єднано з другим електронним ключем 21, виходи другого ключа 21 з'єднано з синхронним детектором 25, вихід якого з'єднано з фазовим детектором 29, вихід якого приєднано до другого реверсивного двигуна 32 механічно зв'язаного з входом атенюатора 4, причому, до других входів підсилювачів сигналу 3 і 15 приєднаний імпульсний модулятор 18, перший, другий і третій виходи синхронізатора 13 з'єднані з керуючими входами першого 19 і другого 21 електронних ключів та другого входу модулятора фази 14, четвертий, п'ятий, шостий і сьомий виходи синхронізатора 13 з'єднані, відповідно, з другими входами першого 22 і другого 25 синхронних детекторів і з другими входами першого 26 и другого 29 фазових детекторів, причому, виходи генераторів синусоїдальних коливань 1 і 8, з'єднано з входами першого 6 та другого 9 змішувачів сигналу, виходи яких з'єднані відповідно, з першим 23, та другим 24 тригерами Шмітта, виходи яких приєднано до схеми співпадіння 27, вихід якої приєднано до входу другої схеми співпадіння 28, причому, вихід генератора 8 приєднано до входу змішувача 7, до другого входу якого приєднано другий вихід фазозсувника 2, а вихід змішувача 7 з'єднано з першим входом фазового детектора 12, до другого входу якого приєднано вихід дільника частоти 11, вихід фазового детектора 12 приєднано до входу генератора 8, вихід вимірального генератора 10 приєднано до дільника частоти 11 та другого входу схеми співпадіння 28.

Установка працює наступним чином [8, 9]. Для автоматичного вимірювання амплітуди і фази сигналу, який пройшов через досліджуваний зразок з амплітудою і фазою сигналу опорного каналу з представленням інформації у двоїчному коді, гармонічний сигнал з генератора 1 одночасно подається до входу 2-х каналів: каналу зондуєчих імпульсів і каналу порівняння, що утворюють напівмостову виміральною схему. Промодульовані

модулятором фази 14 сигнали першого каналу після підсилювача сигналу 15 прямують до випромінюючого датчика ультразвуку 16, що генерує акустичний сигнал в дослідний зразок, який приймається на виході зразка другим датчиком ультразвуку 17 і прямує до одного з входів приймача 5, до другого входу якого подаються зсунуті по фазі фазозсувником 2 та підсилені підсилювачем 3, сигнали порівняння с виходу атенюатора плавного регулювання амплітуди сигналу 4. При подачі з блоку імпульсно-кодової модуляції 18 на обидва підсилювача сигналів 3 і 15, на виході приймача 5 з'являються тактові імпульси, причому повний цикл вимірювання складається із чотирьох тактових імпульсів: на протязі першого і третього з них на виході вимірального напівмосту виникає тільки акустичний сигнал або сигнал порівняння, а на протязі другого і четвертого тактових імпульсів на воді з'являються обидва сигнали, але з різницею фаз між ними. Для підвищення точності вимірювань різниці фази цих сигналів здійснюється перехід схеми з високочастотного діапазону в низькочастотний шляхом гетеродинірування. В якості гетеродину в установці використано другий генератор синусоїдальних коливань 8 з частотою, близькою до частоти генератора 1. При цьому в змішувачах 6 і 9 відбувається перетворення високочастотних сигналів мегагерцового діапазону – в низькочастотні (порядку сотні герц), де вимірювання різниці фаз двох сигналів на порядок вища. Частота другого генератора 8 вибрана такою, щоб період перетворених низькочастотних зондуєчих сигналів і сигналів порівняння дорівнювали величині  $360 \cdot 10^3 \cdot t_0$ , де  $t_0$  – період коливань вимірального генератора 10. (наприклад, при  $n = 1$  точність вимірювання різниці фази сигналів першого і другого каналів складає  $0,1^\circ$ , а при  $n = 2$  – відповідно,  $0,01^\circ$ ). При цьому різниця частот генераторів 1 і 8 дорівнює  $(360 \cdot 10^3 \cdot t_0)^{-1}$  Гц, і при частоті вимірального генератора 10 в 1 МГц ( $t_0 = 1 \mu\text{с}$ ) і  $n = 1$  складає 277,77 Гц. Це здійснюється шляхом змішування частот генераторів 1 і 8 у змішувачі 7 і фазового детектора 12, на який подається опорний сигнал з дільника частоти 11, коефіцієнт поділу частоти якого складає  $360 \cdot 10^3$ . Різниця частот двох генераторів підтримується за рахунок фазового детектора 12 з виходу якого сигнал прямує до переналаштовуємого по частоті генератора 8.

Гармонічні сигнали з виходу змішувачів 6 і 9 прямують до тригерів Шмітта 23, 24, де перетворюються в сигнали у вигляді меандру, які прямують до схеми співпадіння 27, де перетворюється у сигнали прямокутної форми, тривалість яких змінюється в діапазоні від 0 до  $T_\phi$ , на протязі якого і відбувається вимірювання різниці фаз сигналів двох каналів. При подачі цього сигналу і сигналу з вимірального генератора 10 до входу другої схеми співпадіння 28, на її виході формується кодовий сигнал, що містить інформацію про фазу зондуєчого каналу, який через інтерфейс прямує до ЕОМ. Сигнали з виходу приймача 5 подаються до



амплітудного детектора 20 з малою сталою часу ( $\sim 0,1\tau_i$ ) де перетворюються у відеоімпульси з результирующим періодом  $4T$  і далі – на електронні ключі 19 і 21, при подачі на управляючі входи яких імпульсів з синхронізатора 13, на їх виходах формуються когерентні зондуєчі імпульси і імпульси порівняння тривалістю  $\tau_i$  і частотою високочастотного заповнення, яка дорівнює частоті генератора 1. Повний цикл виділення сигналів розбалансу по фазі і амплітуді цих імпульсів відбувається згідно наступної програми. Управляючі сигнали з виходу синхронізатора 13 подаються до управляючих входів електронного ключа 19 після другого, третього та четвертого синхроімпульсів із затримкою в часі на  $t_{зат}$ , яка дорівнює часу проходження ультразвуку дослідного зразка. Різниця фаз  $\phi$  цих когерентних сигналів плавно змінюється на довільну величину за допомогою фазозсувника 2 і модулюється модулятором фази 14 на малу величину  $\Delta\phi$  по закону меандра з періодом  $4T$ . При цьому на виході ключа 19 відбувається почергове запом'ятовування амплітуд акустичного сигналу і сигналу порівняння, що призводить до виділення сигналу розбалансу по амплітуді у вигляді меандру з періодом  $4T$ , амплітуда і фаза якого визначається різницею сигналів, поданих до входу ключа 19. Аналогічно, ключ 20 вмикається при подачі на його управляючий вхід першого, другого та четвертого синхроімпульсів з синхронізатора 13 в моменти, коли на виході приймача 5 виділяється сума акустичного сигналу і сигналу порівняння при різних фазах сигналу порівняння, що здійснюється за допомогою модулятора фази 14 при подачі на нього синхроімпульсів з синхронізатора 13. В результаті, на виході електронного ключа 21, шляхом почергового запом'ятовування і зберігання суми акустичного сигналу і сигналу порівняння, виділяється сигнал розбалансу по фазі  $\Delta\phi$  у вигляді меандру з періодом  $4T$ , амплітуда і фаза якого визначається різницею амплітуд сигналу після амплітудного детектора 20 в моменти подачі управляючих сигналів з синхронізатора 13 на електронний ключ 20. Отримані сигнали розбалансу по амплітуді і фазі подаються до входів синхронних детекторів 22 і 25, а опорні сигнали з періодом  $4T$ , зсунуті на  $90^\circ$  подаються до фазових детекторів 26, 29, з виходу яких сигнали постійного струму, величина і знак яких визначається різницею амплітуд і фаз сигналів порівняння, прямують до реверсивних двигунів 30, 32, які здійснюють балансування пліч напівмостової схеми шляхом зміни першим фазозсувником 2 і атенюатором 4 амплітуди і фази сигналів порівняння. Балансу відповідає рівність амплітуд і протифазність або синфазність порівнювальних сигналів. Перетворення аналогових значень амплітуди у двоїчний код відбувається за допомогою АЦП (аналого-цифрового перетворювача) до входу якого подається електричний сигнал з датчика затухання

плавного атенюатора 4, вісь якого механічно з'єднана з реохордом атенюатора 4.

**Висновки.** Запропонована експериментальна установка для дослідження електронних властивостей провідникових матеріалів забезпечує автоматичне вимірювання амплітуди та фази акустичного сигналу в дослідному зразку з високою роздільною здатністю, що дає змогу отримати великий об'єм та високу якість інформації шляхом застосування запропонованого метода генерування ультракоротких ультразвукових імпульсів та сучасних комп'ютерних методик.

#### Список літератури

1. Рой В.Ф. Звукоэлектрический эффект в цинке. Акустичний вісник (Acoustic bulletin), 1999, Том 2, № 2, С.56–58.
2. Бурма М.Г., Авраменко Ю.А., Філь В.Д. Магнитоакустические эффекты в галлии. – ФНТ., 2012, №38, С. 560–568.
3. Безуглий Е.Б., Бурма М.Г., Дейнека Е.Ю. .... ФНТ, 1999., №19., С.667–672.
4. Гібридний пускорегулювальний апарат для розрядних ламп високого тиску / В. Ф. Рой, Бурма М.Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні апарати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016.– № 32(1204).– С. 32–41. Іл.:2. Бібліогр.: 11 назв.– ISSN 2079-3944.
5. «Ультразвуковое устройство для исследования образцов материалов» А.С. СССР № 1213410, Бурма М. Г. опубл.23.02.86, Бюл. № 7.
6. Патент США № 4449029 МПК 8 В23К 11/24, Acoustic wave spot welder adaptive control. Herman A. Nied. опубл. 15.05.1984.
7. Патент України № 47248. (2009). МПК В06В 3/00 «Ультразвуковой концентратор». Галаган Р.М. Опубл. 25.01.2010.
8. Рой В.Ф., Бурма М.Г. Пускорегулюючий апарат для розрядних ламп високого тиску. Світлотехніка та електроенергетика, 2014.– №4.– С.54-58
9. Методи возбуждения коротких акустических импульсов в пьезопреобразователях с согласующими слоями. /Найда С.А., Коржин А.Р. Ж. «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». 2012, –№ 2, С.24–30.

#### References (transliterated)

1. Roy VF Sound effect in zinc. Acoustic Bulletin (Acoustic bulletin), 1999, Volume 2, No.2, P.56–58.
2. Burma MG, Avramenko Yu.A., Fil VD Magnetoacoustic effects in gallium. TNF., 2012, No. 38, P.560–568.
3. Bezugly EB, Burma MG, Dayneka E.Yu. .... TNF, 1999., No 19., P.667–672.
4. Hybridia start-up apparatus for high-pressure discharge lamps / VF Roy, Burma MG // Bulletin of NTU "KPI". Series: Electric Appliances. – Kharkiv.: NTU "KPI", 2016. – No 32 (1204). – P.32–41. Ill.: 2. Bibliogr. : 11 titles– ISSN 2079-3944.
5. "Ultrasonic device for the study of material samples" AS. USSR No. 1213410, Burma MG Publ. 23.02.86, Bul. No 7.
6. US Patent No. 4449029 IPC 8 В23К 11/24, Acoustic wave spot welder adaptive control. Herman A. Nied. publ. 05/15/1984
7. Patent of Ukraine No. 47248. (2009). IPC В06В 3/00 "Ultrasonic concentrator". Halagan R.M. Publ. 25.01.2010.
8. Roy VF, Burma M.G. Start-up apparatus for high-pressure discharge lamps. Lighting and electricity, 2014. – No4. – P.54–58
9. Methods of excitation of short acoustic pulses in piezoelectric transducers with matching layers. / Naida S.A., Korzhin A.R. G. "Technical diagnostics and non-destructive testing". 2012, –No 2, P.24–30.

Надійшла (received) 06.06.19

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Бурма Микола Гаврилович (Бурма Николай Гаврилович, Burma Nikolay Gavrilovich)** – кандидат фізико-математичних наук, старшій науковий співробітник фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І.Веркіна. Україна, м. Харків, проспект Науки, 47. E-mail:burma@ gmail.com

**Рой Віктор Федорович (Рой Виктор Федорович, Roy Viktor Fedorovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова. Україна. м.Харків, вул. маршала Бажанова, 17. тел.(057) 707-33-16; E-mail: viktor.roy@ gmail.com ORCID ID 0000-0002-9001-9308

**Грініна Вікторія Олегівна (Гринина Виктория Олеговна, Grinina Victoria O.)** – аспірант кафедри систем електропостачання та електроспоживання Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова. Україна. м.Харків, вул. маршала Бажанова, 17. E-mail:viktoriagrinina@gmail.com ORCID ID 0000-0003-4512-5758

УДК 518.83

*Л. В. ГОЛОВКІНА, О. Б. ЗАЙЧЕНКО***РОЗПОДІЛ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ В МОДУЛЬНІЙ АВІОНІЦІ**

Розглянуто розподіл обчислювальних ресурсів між модулями крейти в авіоніці. В інтегрованій модульній авіоніці об'єднуються кілька федеративних систем за обчислювальними ресурсами, а інші частини цих систем (датчики, індикатори, пульти, інтегрований комплект датчиків повітряних сигналів і положення в просторі, радіозасоби зв'язку, впізнання, навігації і посадки, виконавчі пристрої) залишаються за межами обчислювального ядра. Для виконання своїх функцій крейти комплектуються модулями різних типів. Складовими інтегральної модульної авіоніки є обчислювальний модуль, модуль файл-сервера, модуль мережевого контролера, модуль графічної обробки, модуль концентрації сигналів, модуль живлення, модуль підтримки нормальних умов. Невід'ємна властивість інтегрованої модульної авіоніки – модульний склад на основі обмеженого набору апаратних модулів. Складання модулів в крейт зазвичай має за мету підтримання як найбільш програмних додатків, а самі принципи складання модулів у крейт повторюють принципи складання класичних обчислювальних машин. Кожний процесор модульної авіоніки може виконати функції декількох традиційних федеративних систем, а загальна пам'ять та ввід-вивід для усіх функцій повинен забезпечити оптимальне використання апаратних ресурсів. Методи дослідження – методи, що застосовуються в теорії нестратегічних коаліційних ігор. Для рішення задачі розподілу обчислювальних ресурсів в модульній авіоніці використовуються відомі методи рішень в кооперативній моделі гравців, що діють спільно, прагнучи максимізувати сумарний вигравш. Для розв'язання конфлікту, який виник на етапі поділу отриманого сумарного вигравшу визначено С-ядро та застосовано вектор Шеплі.

**Ключові слова:** модульна авіоніка, крейт, розподіл обчислювальних ресурсів, С-ядро, вектор Шеплі, кооперативна модель гравців

*Л.В. ГОЛОВКІНА, О.Б. ЗАЙЧЕНКО***РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКЕ**

Рассмотрены распределение вычислительных ресурсов между модулями крейти в авионике. В интегрированной модульной авионике объединяются несколько федеративных систем по вычислительным ресурсам, а другие части этих систем (датчики, индикаторы, пульти, интегрированный комплект датчиков воздушных сигналов и положения в пространстве, радиосредства связи, опознавания, навигации и посадки, исполнительные устройства) остаются за пределами вычислительного ядра. Для выполнения своих функций крейти комплектуются модулями различных типов. Составляющими интегральной модульной авионики является вычислительный модуль, модуль файл-сервера, модуль сетевого контроллера, модуль графической обработки, модуль концентрации сигналов, модуль питания, модуль поддержания нормальных условий. Неотъемлемое свойство интегрированной модульной авионики – модульный состав на основе ограниченного набора апаратных модулей. Составление модулей в крейт обычно имеет целью поддержания как наиболее приложений, а сами принципы составления модулей в крейт повторяют принципы составления классических вычислительных машин. Каждый процессор модульной авионики может выполнить функции нескольких традиционных федеративных систем, а общая память и ввід-вывод для всех функций должен обеспечить оптимальное использование апаратных ресурсов. Методы исследования – методы, использующиеся в теории стратегических коалиционных игр. Для решения задачи распределения вычислительных ресурсов в модульной авионике используются известные методы решений в кооперативной модели игроков, действующих совместно, стремясь максимизировать суммарный выигрыш. Для разрешения конфликта, который возник на этапе разделения полученного суммарного выигрыша определено С-ядро и применен вектор Шепли.

**Ключевые слова:** модульная авионика, крейт, распределение вычислительных ресурсов, С-ядро, вектор Шепли, кооперативная модель игроков

*L. V. GOLOVKINA, O. B. ZAICHENKO***MODULAR AVIONICS COMPUTING RESOURCES DISTRIBUTION**

The distribution of computational resources among crate modules in avionics is considered. In an integrated modular avionics, several federated systems for computational resources are combined, and other parts of these systems (sensors, indicators, consoles, an integrated set of sensors for air signals and position in space, radio communications, identification, navigation and landing, executive devices) remain outside the computational core. To perform its functions, the crates are equipped with modules of various types. The components of the integrated modular avionics are the computing module, the file server module, the network controller module, the graphics processing module, the signal concentration module, the power module, and the module for maintaining normal conditions. An integral feature of integrated modular avionics is a modular composition based on a limited set of hardware modules. The compilation of modules into a crate is usually aimed at maintaining as the applications, while the principles of compiling modules into a crate repeat the principles of compiling classical computers. Each modular avionics processor can perform the functions of several traditional federated systems, and the shared memory and I/O for all functions should ensure optimal use of hardware resources. Research methods – methods used in the theory of strategic coalition games. To solve the problem of allocating of computing resources in modular aviation, known solutions methods are used in the cooperative model of players acting together to maximize the total gain. To resolve the conflict that arose at the stage of the division of the obtained total winnings, the C-core was determined and the Shapley vector was applied.

**Key words:** modular avionics, crate, distribution of computing resources, C-core, Shapley vector, cooperative player model

**Вступ.** Модульна авіоніка з'явилась з 1990-х років і відрізняється високим ступенем інтергації систем і використанням загальних ресурсів. Комплекс функціональних систем з власними обчислювачами та бортовою центральною обчислювальною машиною зараз будується на основі єдиної загальної апаратної платформи. Програмні додатки стали виконувати функції систем і поділяти загальні обчислювальні ресурси. Така інтегрована модульна авіоніка

складається з окремих модулів, які взаємодіють один з одним по високошвидкісній мережі передачі даних. Для стиківки з нецифровими датчиками та виконуваними пристроями використовуються концентратори даних, які взаємодіють зі старими системи, що не переробляється під інтегровану модульну авіоніку, а встановлюється на борт літака в традиційному вигляді. Модульний склад на основі обмеженого набору апаратних модулів повинен

© Л. В. Головкина, О. Б. Зайченко, 2019

визначати ті обчислювальні ресурси, які кожен модуль надає для виконання своїх функцій.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** В інтегрованій модульній авіоніці склад модулів уніфікований. По своїм розмірами модулі менше звичних електронних блоків і розміщуються в загальному корпусі – крейті. Крейт є платформою для установки модулів з інтерфейсами для їхньої взаємодії і забезпечує нормальні умови роботи: електроживлення, температуру, захист від електромагнітних завад тощо. Поєднання різних модулів в одному крейті, використання і справедливий розподіл їх обчислювальних ресурсів є дуже цікавою задачею, що потребує додаткових досліджень в цьому напрямі.

Для виконання своїх функцій крейти комплектуються модулями різних типів. Як типові, але з різним функціональним призначенням можуть застосовуватись: обчислювальний модуль, модуль файл-сервера, модуль графічної обробки, модуль концентрації сигналів, модуль мережевого контролера, модуль живлення, модуль підтримки нормальних умов. В складі інтегрованої модульної авіоніки може бути один або де-кілька крейтів, що вміщують відразу усі модулі, або крейти, що мітять не всі типові модулі, але, як правило, повинно бути мінімум два, що дозволяє поліпшити використання обчислювальних ресурсів обох крейтів і розподіляти між ними завдання, і також забезпечити надійність роботи на випадок відмов.

В інтегрованій модульній авіоніці поєднуються кілька федеративних систем за обчислювальними ресурсами, а інші частини цих систем (датчики, індикатори, пульти, інтегрований комплект датчиків повітряних сигналів і положення в просторі, радіозасоби зв'язку, впізнання, навігації і посадки, виконавчі пристрої) залишаються за межами обчислювального ядра. Загальна апаратна платформа для обчислювальних ресурсів у вигляді крейту забезпечує основні функції авіоніки. Інша невід'ємна якість інтегрованої модульної авіоніки – модульний склад на основі обмеженого набору апаратних модулів. Та складання модулів в крейт зазвичай має за мету підтримання як найбільш програмних додатків, а самі принципи складання модулів у крейт повторюють принципи складання класичних обчислювальних машин. Кожний процесор модульної авіоніки може виконати функції декількох традиційних федеративних систем, а загальна пам'ять та ввід-вивід для усіх функцій повинен забезпечити оптимальне використання апаратних ресурсів.

Крейт конструктивно може бути виконаним відкритим з переднього боку, що забезпечує вільний доступ до модулів для заміни їх в умовах експлуатації. Інтегруються зазвичай модулі, що забезпечують ресурсоемні обчислювальні функції. Їх склад визначається вимогами конкретного застосування.

**Існуючі складові інтегрованої модульної авіоніки.** Обчислювальний модуль містить процесор, пам'ять і здійснює обробку інформації. Цей модуль

можна вважати повноцінною бортовою обчислювальною машиною, але без власного електроживлення. Таких модулів встановлюють в крейті декілька. Кожен з них здатний виконувати в режимі поділу часу кілька програмних додатків.

Модуль файл-сервера виконує функцію електронної бібліотеки, до якої можуть звертатися інші модулі.

Модуль мережевого контролера служить для зв'язку крейта з локальною мережею комплексу. Важливо, яка буде реалізація топології для даного модуля, його обчислювальні ресурси слід вважати пристосованими до цієї задачі, забезпечуючи полнодуплексний зв'язок компонентів мережі. Одночасно через модуль можуть обмінюватися даними кілька пар модулів.

Модуль графічної обробки замінює традиційний генератор символів. Він отримує інформацію для відображення, готує і передає в індикатори підготовлене зображення. Отримане від сенсора зображення масштабується, на нього накладається символічна інформація і підготовлене для індикації зображення передається в індикатор.

Модуль концентрації сигналів служить для прийому тієї інформації від літакових систем і датчиків, яка надходить в комплекс з бортових інтерфейсів різних видів. Модуль перетворює цю інформацію, упаковує її і передає в мережу комплексу для використання іншими модулями. Але модуль служить не тільки концентратором сигналів, він є шлюзом між сучасною модульною авіонікою та нецифровою частиною її. Модуль може розташовуватися і поза основного крейта – ближче до датчиків сигналів, і виконуватися у вигляді окремого блоку.

Модуль живлення перетворює первинну напругу бортмережі в номінали напруг, що необхідні для живлення інших модулів крейта.

Модуль підтримки нормальних умов забезпечує охолодження або підігрів крейта.

**Мета роботи.** Крім типових модулів, в крейт можуть вставлятися модулі, що виконують специфічні функції, які недоцільно або неможливо доручити типовим модулям. Тенденція до змін в авіоніці, що поєднує «крейтовий» підхід та «розподілену» інтегровану модульну авіоніку, для якої контейнерами для модулів можуть бути будь-які електронні блоки, їхнє розміщення в різних місцях літака не критичне, а всі модулі функціонують точно також, як би вони знаходилися в єдиному крейті за рахунок високошвидкісної мережі вимагає вивчення можливостей розподілу обчислювальних ресурсів не тільки самих модулів, а з прив'язкою до інтерфейсів. Для спрощення, будемо вважати поєднання різних модулів в одному крейті. Розподіл їх обчислювальних ресурсів є метою даної роботи.

**Постановка задачі.** Для спрощення підходів до розрахунків рішення задачі розподілу обчислювальних ресурсів в модульній авіоніці визначимо, наприклад, що крейт складатимуть три типові модуля: модуль графічної обробки (1), модуль

мережевого контролера (2), обчислювальний модуль (3). Живленням і нормальними умовами функціонування вони забезпечені за замовчуванням, окремо кожен модуль не експлуатується. Кожен з модулів має свої обчислювальні ресурси, але вони можуть працювати або в парі, або всі разом, тобто: є набір з працездатних поєднань 1-2 (600 Мбіт/с), 1-3 (800 Мбіт/с), 2-3 (1000 Мбіт/с), та 1-2-3 (1350 Мбіт/с). Для рішень такої задачі доцільно скористатися відомими методами рішень в кооперативній моделі гравців, що діють спільно, прагнучи максимізувати сумарний виграш. Конфлікт може виникнути тільки на етапі поділу отриманого сумарного виграшу. Саме для справедливого розподілу можна застосувати вектор Шеплі.

**Методи дослідження.** При розгляді стратегічних ігор передбачається, що кожен гравець діє ізольовано від інших, але в загальному випадку така поведінка не завжди вигідна. На практиці в типово ігрових ситуаціях учасники заключають між собою угоди, утворюють союзи, коаліції. Якщо учасники по умові гри в змозі домовитися один з одним, то рішення – тобто виграші гравців, не залежатиме від обраних ними стратегій, а тільки від способу ділення загального виграшу. При цьому для них важливо ще і те, наскільки вигідно їм вступати в таку коаліцію. Коли гравці об'єднані в коаліцію, природно розглядати їх загальний виграш, який може бути одержаний в грі. Зрозуміло, гравців цікавить максимально гарантований виграш, який і є мірою корисності їхнього об'єднання. Саме цей підхід можна реалізувати, якщо розглядати задачу поєднання модулів у крейті з точки зору теорії нестратегічних коаліційних ігор, і підтвердити необхідність їхнього поєднання для забезпечення максимально можливого виграшу тобто розподілу їх обчислювальних ресурсів.

Характеристичною функцією  $v(k)$  називається найбільший виграш, що упевнено одержується коаліцією  $k$  гравців  $I$ . Ллойда Шеплі прийнято вважати основоположником теорії кооперативних ігор за його дослідження способів справедливого розподілу.

Характеристична функція  $v(k)$  кожної коаліції ставить у відповідність спільні обчислювальні ресурси її членів. Характеристична функція в принципі може бути негативною (розподіл витрат), але в нашому випадку вона позитивна; порожня коаліція нічого не отримує і нічого не повинна, тобто  $v(\emptyset) = 0$ .

Перш за все, кожен гравець вступає в коаліцію тільки в тому випадку, якщо це, принаймні, не зменшує його виграш, якщо:

$$x_i \geq v(i) \quad \text{егалітарний підхід;}$$

$$\sum x_i = v(i) \quad \text{утилітарний підхід.}$$

Приведені умови носять назви індивідуальної і колективної раціональності, оскільки дозволяють одержати максимальну вигоду і використовувати можливості поєднання повністю.

Діленням в умовах характеристичної функції  $v$  називається вектор  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , що задовольняє умовам індивідуальної і колективної раціональності.

Безліч ділень дає набір можливих рішень, оскільки ділення відповідають умовам індивідуальної і колективної раціональності. Але ділень багато і вони різні. Перевагу якому з них віддати? Це завдання векторної оптимізації, а принцип оптимізації може бути найрізноманітніший.

У достатньо загальній моделі ухвалення рішення головним є прогноз дій партнерів (модулів), оскільки якщо він є, то інше – порівняно просте завдання максимізації вигоди учасника (модуля) в умовах ризику.

Тому оптимальність в теорії ігор і розуміється як очікуване, можливе. Оптимальними результатами називаються результати, можливі в умовах допустимих дій гравців і коаліцій, що здійснюються згідно їх інтересів.

Безліч ділень в кооперативній грі, кожне з яких не домінується ніякими іншими діленнями, називається С-ядром цієї гри.

Для того, щоб ділення  $x$  належало С-ядру кооперативної гри з характеристичною функцією  $v$ , необхідне і досить, щоб для будь-якої коаліції  $k$  виконувалася нерівність:

$$\sum_{i \in k} x_i \geq v(k).$$

Неважко бачити, що 0-1 редуцирована форма істотної кооперативної гри дозволяє по характеристичній функції відразу ж судити про ефективність об'єднання в коаліцію:

$$v^*(k) = (v(k) - \sum_{i \in k} v(i)) / (v(I) - \sum_{i \in I} v(i)), \quad (1)$$

Визначимо вектор Шеплі для цієї гри. В нередуциованій формі  $n$  (кількість поєднаних модулів  $n=3$ ), коаліції можуть бути із одного, двох та трьох гравців.

$$\Phi_i = \sum_{i \in k \subset I} \frac{(n - |k|)! (|k| - 1)!}{n!} (v(k) - v(k \setminus i)). \quad (2)$$

**Результати чисельного моделювання.** Розглянемо можливі поєднання («гру») трьох модулів:

$$\begin{aligned} v(\emptyset) &= v(1) = v(2) = v(3) = 0. \\ v(1,2,3) &= 1350. \\ v(1,2) &= 600. \\ v(1,3) &= 800. \\ v(2,3) &= 1000. \end{aligned}$$

Ділення  $x = (x_1, x_2, x_3)$  належить до С-ядра тільки тоді, коли виконується наступна система:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= 1350. \\ x_1 + x_2 &\geq 600. \\ x_1 + x_3 &\geq 800. \\ x_2 + x_3 &\geq 1000. \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 &\geq 0. \end{aligned}$$

Отримаємо еквівалентну систему умов.

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1350.$$

$$0 \leq x_3 \leq 750.$$

$$0 \leq x_2 \leq 550.$$

$$0 \leq x_1 \leq 350.$$

На рис. 1 С-ядро в даній грі геометрично зображено як перетин площини  $x_1 + x_2 + x_3 = 1350$  та опуклого паралелепіпеду  $0 \leq x_1 \leq 350$ ,  $0 \leq x_2 \leq 550$ ,  $0 \leq x_3 \leq 750$ .

С-ядро представляє трикутник ABC з координатами вершин:

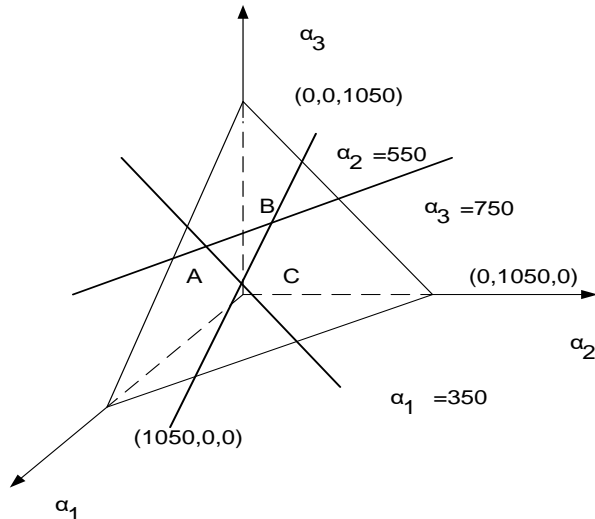


Рис. 1 – С-ядро

A(350,250,750); B(50,550,750); C(350, 550, 450).

Ділення (250,450,650) як середнє арифметичне межових точок є справедливим компромісом всередині С-ядра, тому, що кожна двухмодульна «коаліція» отримує однаковий додатковий виграш в 100 (Мбіт/с).

Ефективність об'єднання в коаліцію згідно з виразом (1):

$$v'(1,2) = 0,51.$$

$$v'(1,3) = 0,66.$$

$$v'(2,3) = 0,81.$$

$$v'(1,2,3) = 1$$

Визначимо вектор Шеплі за формулою (2):

$$\Phi_1 = (3-3)! (1350 - 1000) / 3! + 1! 1! [(600 - 0) + (800 - 0)] / 3! = 350;$$

$$\Phi_2 = 450;$$

$$\Phi_3 = 550.$$

Можна бачити, що,  $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 1350$ , тобто умова колективної раціональності виконується. З іншого боку:  $\Phi_1 = 350 > v(1) = 0$ ;  $\Phi_2 = 450 > v(2) = 0$ ;  $\Phi_3 = 550 > v(3) = 0$ , умова індивідуальної раціональності виконується.

**Висновки.** Поєднання різних модулів в одному крейті, розподіл їх обчислювальних ресурсів можна реалізувати, якщо розглядати цю задачу як рішення задачі з точки зору теорії нестратегічних коаліційних ігор. Для забезпечення максимально можливого виграшу тобто розподілу їх обчислювальних ресурсів підтверджена необхідність їхнього поєднання як показано в наведеному прикладі.

#### Список літератури

1. Родин В. А. Теория принятия решений Воронеж: Воронежский институт МВД России. 2012. – 413 с.
2. Данилов В. И. Лекции по теории игр. М.: Российская экономическая школа, 2002. – 140 с.
3. Печерский С. Л., Беляева А. А. Теория игр для экономистов. Вводный курс: учебное пособие. СПб.: Изд-во Европ. Ун-та в С.-Петербурге, 2001. – 342 с.
4. Доценко С. И. Вектор Шепли как способ справедливого распределения *Журнал обчислювальної та прикладної математики*. 2014. №. 3. С. 111–122.

#### References (transliterated)

1. Rodin V. A. Teoriya prinyatiya resheniy [The decision theory]. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii. 2012. – 413 p.
2. Danilov V. I. Lektsii po teorii igr [The game theory lecture]. Moscow: Rossiyskaya ekonomicheskaya shkola, 2002. – 140 p.
3. Pecherskiy S. L., Belyayeva A. A. Teoriya igr dlya ekonomistov Vvodnyy kurs: uchebnoye posobiye [The game theory for economists. Introduction course]. SPb.: Izd-vo Yevrop. Un-ta v S.-Peterburge, 2001. – 342 p.
4. Dotsenko S. I. Vektor Shepli kak sposob spravedlivogo raspredeleniya [Shaple vector as method of fair resources distribution] *Zhurnal obchislyuval'noi ta prikladnoi matematiki [The computing and applied mathematics magazine]*. – 2014. – No 3. – P. 111–122.

Надійшла (received) 06.06.19

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Головкіна Людмила Вячеславівна (Golovkina Lyudmila Vyacheslavovna)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри ПЕЕА, м.Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5929-3256>, e-mail: [liudmyla.holovkina@nure.ua](mailto:liudmyla.holovkina@nure.ua)

**Зайченко Ольга Борисівна (Zaichenko Olga Borisovna)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри ПЕЕА, м.Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4936-2785>, e-mail: [olha.zaichenko@nure](mailto:olha.zaichenko@nure).



УДК 53.05

**І. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. О. ПИСЬМЕНЕЦЬКИЙ, О. В. ГРИГОР'ЄВА, О. С. СІКАЛО, Д. О. СУК****ТРЕКЕРНА СИСТЕМА СТЕЖЕННЯ ЗА СОНЦЕМ**

В процесі роботи було виконано обґрунтування апаратної частини керування сонячною електростанцією з використанням активної трекерної системи. Розроблено макет плати керування на основі контролера Arduino Unoі, створена демонстраційна програма у середовищі Arduino IDE. Встановлено, що найбільш гнучкими і ефективними системами управління трекерними установками є активні та гібридні системи, з причини відсутності недоліків, властивих іншим системам управління. Єдиним недоліком гібридної системи можна вважати підвищену енергоємність системи управління.

**Ключові слова:** трекерна система, фотодатчик, електродвигун, мікроконтролер, сервопривід, фоторезистор.

**И. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. А. ПИСЬМЕНЕЦКИЙ, О. В. ГРИГОРЬЕВА, А. С. СИКАЛО, Д. А. СУК****ТРЕКЕРНАЯ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ**

В процессе работы было выполнено обоснование аппаратной части управления солнечной электростанцией с использованием активной трекерной системы. Разработан макет платы управления на основе контроллера Arduino Unoі, создана демонстрационная программа в среде Arduino IDE. Установлено, что наиболее гибкими и эффективными системами управления трекерными установками являются активные и гибридные системы, по причине отсутствия недостатков, присущих другим системам управления. Единственным недостатком гибридной системы можно считать повышенную энергоёмкость системы управления.

**Ключевые слова:** трекерная система, фотодатчик, электродвигатель, микроконтроллер, сервопривод, фоторезистор.

**I. NEVLYUDOV, V. PISMENETSKY, O. GRIGORIEVA, O. SIKALO, D. SUK****TRACKING SYSTEM FOR TRACKING THE SUN**

In the course of the work, the justification of the hardware of the control of the solar power plant was performed using an active tracker system. Layout of control board based on Arduino Uno controller and demo program created in Arduino IDE. Calculations show that the tracking system produces 57% more energy than static. The sun's rays reaching the earth's surface pass through a thick layer of the atmosphere. Taking into account the influence of the atmosphere, the insolation on the Earth's surface will be less. Trackers do not have to point directly in the sun to be effective. Comparisons between different solar tracking systems showed that the increase in annual energy production using a biaxial tracker and a uniaxial vertical tracking tracker was 30% and 18%, respectively. The most flexible and efficient control systems for tracker systems are active and hybrid systems, due to the lack of disadvantages inherent in other control systems. The only disadvantage of the hybrid system can be considered the increased energy consumption of the control system.

**Keywords:** tracker system, photo sensor, electric motor, microcontroller, servomotor, photoresistor.

**Вступ.** Україна є енергодефіцитною країною та імпортує близько 75% енергоносіїв. Також українська промисловість є досить енергоємною, оскільки в 3 – 5 рази перевищує відповідні показники економічно розвинутих країн, тому Україна є надзвичайно чутлива до умов імпортування природних енергоносіїв.

Використання відновлювальних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики України. Збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії в енергетичній системі України сприятиме підвищенню диверсифікації джерел енергоносіїв, що, в свою чергу, сприятиме зміцненню енергетичної незалежності країни.

На сьогодні залишається актуальним питання виробництва електроенергії за допомогою відновлювальних джерел енергії, одним з найперспективнішим напрямком якого є ефективне використання сонячної інсоляції.

Географічне розташування України дає потенціал сонячного випромінювання, що може досягати до 1400 кВт · год / м<sup>2</sup>, однак, слід зазначити, що найефективніше використання сонячних систем є можливим протягом 5–7 місяців, в залежності від місяця розташування самої СЕС.

Таким чином, дослідження в галузі систем керування та оптимізації сонячних електростанцій є актуальними.

Досягнення мети здійснюється розв'язанням комплексу задач:

- проведенням аналізу сучасного стану проблеми сонячної енергетики України;
- розрахунків ефективності активних стежачих систем;
- проведенням експериментів щодо реальних оцінок ефективності методу керування та визначення його оптимального алгоритму;
- проведенням експериментальних досліджень створеної системи.

**Падаюче випромінювання на поверхню Землі.** Земля обертається навколо Сонця по еліптичній орбіті з Сонцем в якості одного з фокусів. Площина цієї орбіти називається екліптикою. Час, необхідний Землі для завершення цієї орбіти, визначається в рік. Відносне положення Сонця і Землі зручно представити за допомогою небесної сфери навколо Землі.

Екваторіальна площина перетинає небесну сферу у небесному екваторі і полярну вісь в небесних полюсах. Рух Землі навколо Сонця потім зображується видимим рухом Сонця в еліптичній площині, що нахилена в 23.45° навколо небесного екватора. Кут між лінією, що з'єднує центри Сонця і Землі, і її проекцією на екваторіальну площину називається кутом схилення Сонця ( $\delta$ ).

Цей кут дорівнює нулю весною (20/21 березня) та восени (22/23 вересня).

Земля сама обертається зі швидкістю один оборот в день навколо полярної осі. Щоденне

обертання Землі зображується обертанням небесної сфери навколо полярної осі, а миттєве положення сонця описується годинним кутом  $\nu$ , (кут між меридіаном, що проходить через сонце, і меридіаном площадки). Часовий кут дорівнює нулю в полудень і збільшується на схід. Для спостерігачів на земній поверхні на місце розташування з географічною широтою  $w$ , зручна координата визначається вертикальною лінією на ділянці, що перетинає небесну сферу у двох точках - зеніті і надирі і становить кут  $w$  з полярною віссю (рисунок 1). Велике коло, перпендикулярне вертикальній осі є горизонтом.

Широта ( $w$ ) точки або місце знаходження – це кут, створюваний радіальною лінією, що з'єднує місце розташування з центром Землі з проекцією лінії на екваторіальну площину. Вісь обертання Землі перетинає земну поверхню на широті  $90^\circ$  (Північний полюс) і на широті  $-90^\circ$  (Південний полюс).

Будь-яке місце розташування на поверхні Землі може бути визначено перетином кута довготи і кута широти.

Кут висоти Сонця ( $\alpha$ ) визначається, як вертикальний кут між проекцією сонячних променів на горизонтальну площину і напрямком сонячних променів, що проходять через точку, як показано на рисунку 1. В якості альтернативи, висота Сонця може бути описана в термінах сонячний зенітний кут ( $\theta_z$ ), який є вертикальним кутом між сонячними променями і лінією, що перпендикулярна горизонтальній площині через точку ( $\theta_z = 90 - \alpha$ ). Сонячний азимутальний кут ( $\gamma_s$ ) – це горизонтальний кут, що від півдня (в північній півкулі) до горизонтальної проекції сонячних променів.

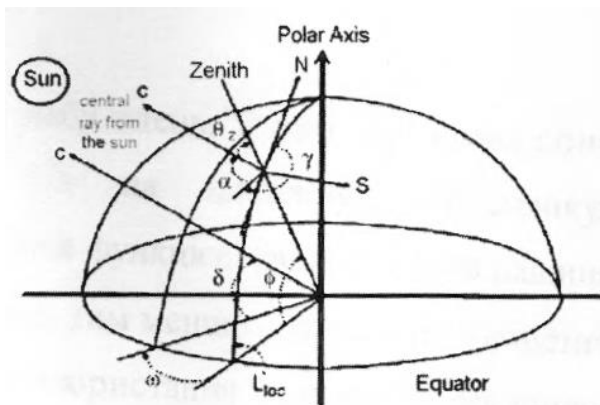


Рис.1 – Схематичне зображення сонячних кутів

Сонце рухається по небу вдень. У разі нерухомих сонячних колекторів, проекція площі колектора на площину, перпендикулярна напрямку випромінювання, визначається функцією косинуса кута падіння (рисунок 2).

Чим вище кут падіння  $\theta$ , тим менше потужність (рисунок 3). Теоретичний розрахунок витягнутої енергії, в разі використання стежачою площиною, здійснюється виходячи з припущення, що

максимальна інтенсивність випромінювання  $I = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$  падає на область, орієнтовану перпендикулярно напрямку випромінювання. Якщо взяти тривалість дня  $t = 12 \text{ год} = 43 \text{ 200с}$ , то інтенсивність стеження площини, яка завжди оптимально орієнтована щодо сонця, порівнюється з інтенсивністю фіксованого колектора, який орієнтований перпендикулярно напрямку випромінювання тільки в полудень. Область колектора позначена як  $S_0$ .

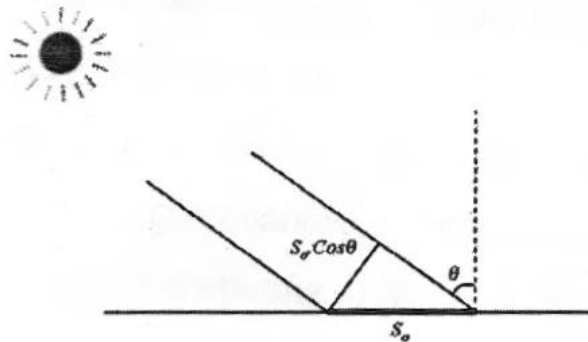


Рис. 2 – Кут падіння сонячного випромінювання

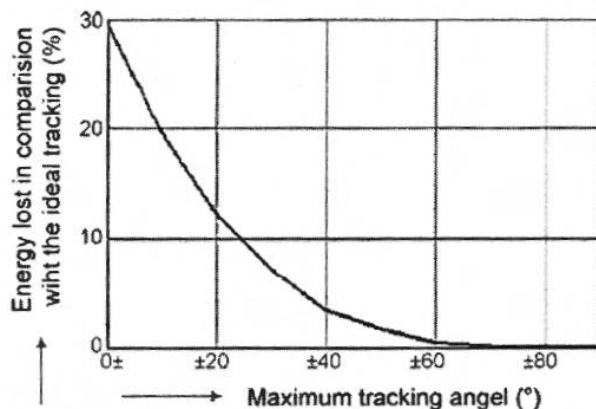


Рис. 3 – Енергія втрачається в залежності від максимального кута відстеження в порівнянні з ідеальним

Для фіксованої площини площа проекції в області орієнтованої перпендикулярно напрямку випромінювання, дорівнює

$$S = S_0 \cdot \cos \theta,$$

де  $\theta$  змінюється в інтервалі  $(-\pi/2; +\pi/2)$  протягом дня.

**Збільшення енергії в системах стеження.**

Стеження за сонцем може бути реалізоване з використанням одноосової, для більш високої точності, і двохосової системами стеження. Для двохосової системи потрібні дві координати позиціонування: полярне (екваторіальне) стеження і азимутальне (вертикальне). Сонячний трекер підтримує фотоелектричні панелі в оптимальному положенні – перпендикулярно сонячним променям в денний час і, таким чином, збільшує кількість зібраної енергії. Перший трекер, представлений К. Финстером в 1962 році, був повністю механічним. Через рік Сааведра представила механізм з автоматичним електронним управлінням, який використовувався для орієнтації піргеліометра Eppley [12].

**Розробка оптимального методу управління та системи керування сонячної електростанції. Обґрунтування вибору апаратної частини.** Активні трекерні системи, у відмінності від пасивних, вимагають живлення електричною енергією для пересування опорного майданчика. Тому саме така система потребує оптимального методу управління.

Для більш точного уявлення створений експериментальний макет системи, що працює по принципу управління за допомогою фотоелектричних датчиків і гібридної системи. Макет є зменшеним варіантом існуючої системи управління сонячної електростанції; до якої буде застосований оптимальний метод управління та розрахунок усіх вихідних показників та витрат енергії на пересування опорного майданчика порівняно із стаціонарною сонячною електростанцією.

Розглянемо принцип роботи системи з управлінням за допомогою фотоелектричних датчиків. Робота такої системи базується на принцип порівняння показників фотоелектричних датчиків за допомогою мікроконтролера, який у свою чергу формує сигнал, що відправляється до виконавчих пристроїв. Виконавчими пристроями в трекерній системі є електродвигуни, пов'язані з редукторами. Принцип роботи системи стеження, оснований на порівнянні показників фотоелектричних датчиків, зображено на рисунку 4.

Для правильної роботи стежачої системи, принцип роботи якої побудований на порівнянні показників фотоелектричних датчиків, необхідно забезпечити дві основні умови: правильна установка фотодатчиків і коректний програмний код для мікроконтролера.



Рис.4 – Принцип роботи системи стеження, що базується на порівнянні показників фотоелектричних датчиків

Для різних типів мікроконтролерів потрібний код на різних мовах програмування, наприклад, C, C++, C#, Basic, Assembler. Незалежно від мови програмування, до коду програми пред'являється

наступна вимога: алгоритм програми повинен забезпечувати високу точність прочитування даних і позиціонування, при цьому він повинен відсікати коливання, викликані похибкою виміру або перешкодами в сигнал~ що приймається.

Завдання програми мікроконтролера полягає в тому, щоб подавати керуючі сигнали, на виконавчі пристрої при дотриманні одних умов (різниця показників фотоелектричних датчиків) і відключити сигнал, що управляє, у момент дотримання іншої умови (різниця показників відсутня). Правильна установка фотодатчиків повинна забезпечити необхідну різницю показників однієї або двох пар фотоелектричних сенсорів. Існує три основні способи установки фотоелектричних датчиків.

**Перший спосіб** установки припускає розташування двох датчиків на одній площині паралельній стежачій площині. Строго по середині між двома датчиками розташовується затінюючий пристрій. Цей затінюючий пристрій обмежує рівень освітленості одного з датчиків, за умови, що увесь пристрій повернено відносно сонячних променів на деякий градус. При цьому, різниця рівня освітленості фотодатчиків буде прямо пропорційна куту між площиною і сонячними променями. У разі, коли стежача площадка повернена до Сонця під кутом в 90°, рівень освітленості фотоелектричних датчиків по обидві сторони від затінюючого пристрою буде однаковий. Ця умова відповідає моменту відключення сигналу, що управляє, з виконавчих пристроїв.

**Другий спосіб** установки припускає розташування фотоелектричних датчиків на двох гранях трикутної призми, або на чотирьох гранях піраміди з квадратом в основі. У разі такого розташування різниця рівня освітленості забезпечується самим розташуванням датчиків.

**Третій спосіб** установки забезпечує найбільшу точність показників датчиків. Проте, вимагає високоточних датчиків і наявності коліаторної трубки. Коліаторна трубка - цей пристрій, який має в центрі вузький проріз, який обмежує попадання на датчики відбитих і заломлених сонячних променів і пропускає тільки прямі сонячні промені.

Такий спосіб визначення положення Сонця застосовується досить не часто, оскільки пристрій з таким принципом має значно більш високу вартість відносно аналогів.

Перевагою систем, що використовують для орієнтації на Сонце принцип порівняння показників фотоелектричних датчиків, є відносна простота алгоритму роботи.

Загальний недолік таких систем проявляється в хмарні дні. У разі, коли хмара затінює трекерну систему з фотоелектричними датчиками, останні фіксують близькі значення освітленості з обох боків затінюючого пристрою, або граней піраміди. Це пов'язано з тим, що водяна пара в хмарі відносно рівномірно розсіює сонячне світло, забезпечуючи майже однакову освітленість усіх фотодатчиків з уявним джерелом світла, що знаходиться перпендикулярно до поверхні Землі. У наслідку цього

мікроконтролер подає такі управляючі сигнали, що стежача платформа орієнтується паралельно поверхні Землі. Після закінчення часу затінення хмарою, система починає здійснювати рух в пошуку нового положення Сонця. Подібна поведінка системи призводить до підвищених витрат енергії на поворот конструкції під час хмарності і після закінчення цього часу – під час пошуку нового положення. При цьому підвищення вироблення сонячними панелями електроенергії не спостерігається.

Активні трекерні системи мають недолік перед пасивними в тому, що для їх роботи потрібне постійне електроживлення. Проте, активні стежачі пристрої мають ряд переваг:

- висока точність позиціонування;
- велика рухома здатність системи;
- гнучкість в управлінні.

#### Склад компонентів макету та їх підключення.

Проаналізувавши існуючі методи управління і визначившись з необхідним для оптимізації методом, оберемо та обгрунтуємо підбір необхідних компонентів для макету.

Для початку необхідно обрати плату управління, а саме той необхідний для реалізації нашого методу стеження мікроконтролер, алгоритм програми якого повинен забезпечувати високу точність зчитування даних і позиціонування, при цьому він повинен відсікати коливання, викликані похибкою виміру або перешкодами в сигналі, що приймається.

На вибір було 4 варіанта плати керування, а саме Arduino Nano, Arduino Mega, Arduino Uno та Arduino Due.

Для реалізації нашого методу було обрано Arduino Uno. Плату керування Arduino UNO наведено на рисунку 5.

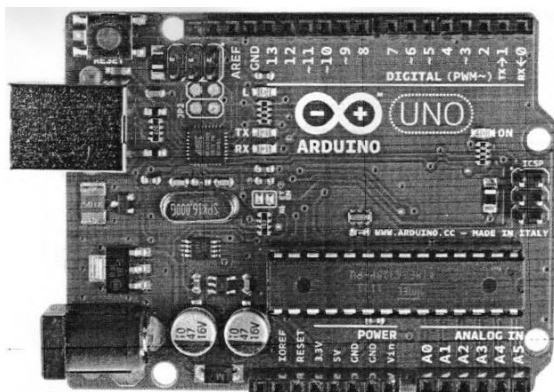


Рис. 5 – Плата управління Arduino UNO

Після того, як визначилися з мікроконтролером, треба підібрати інші компоненти системи для реалізації сонячного трекера.

Для обертання платформи в горизонтальній і вертикальній площинах використовуються сервоприводи, кут повороту яких залежить від потужності світла, що падає на фоторезистори.

Легкий, якісний міні серво SG90 з пусковим моментом 2 кг/см (рисунку 6).

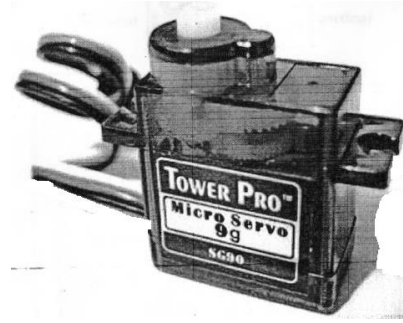


Рис. 6 – Сервопривід SG90 з пусковим моментом 2 кг/см

Оскільки сервоприводи можуть обертатися тільки на 180 градусів, потрібно два таких для макету. Для відстеження сонячних променів використаємо чотири фоторезистора LDS 20-30K.

Пристрій було виконано на макетній платі, розміром 5 см на 5 см, а з'єднання усіх елементів виконано дротами МГТФ.

Обравши усі необхідні компоненти необхідно виконати схему підключення. Це є важливою частиною, якою не можна нехтувати. Принципова схема підключення елементів наведена на рисунку 7.

Отже, розробивши схеми підключення компонентів системи керування, необхідно підключити до них живлення (рисунку 8). Для цього необхідний понижуючий модуль Amigo AMS-47-0501000FV DC-DC постійного струму.

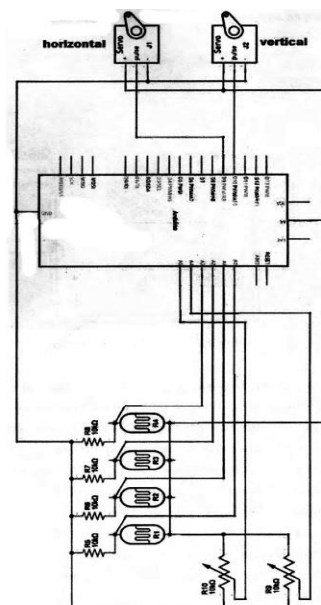


Рис.7 – Принципова схема підключення елементів

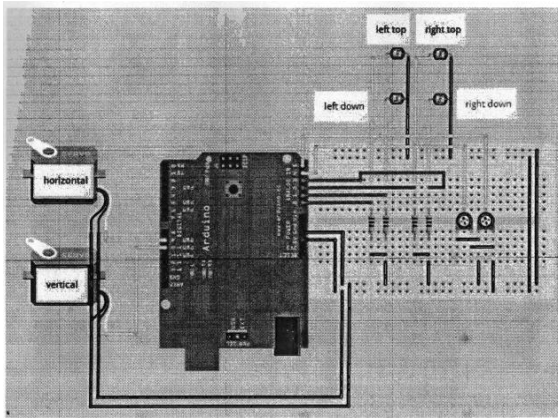


Рис. 8 – Макетна схема підключення компонентів

Після того, як було розроблено схему підключення усіх елементів макету, необхідно виконати з'єднання усіх компонентів та закріпити їх на корпусі. Узятю за основу саморобну щоглу та корпус з ніжками. На мачту прикріплено 4 фоторезистора, що виконують найважливішу роль цього макета (рисунок 9). Вони з'єднані з сервоприводами, які надійно зафіксовані болтами, для міцності макета. Сервоприводи виконують обертання щогли, в залежності від показань датчиків.

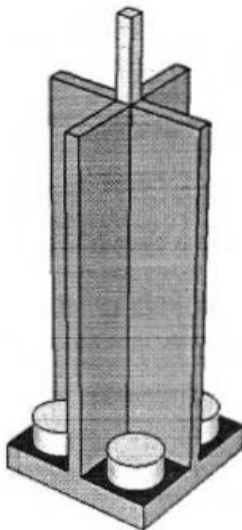


Рис. 9 – Спроектвана модель щогли з фоторезисторами

#### Розробка алгоритму та програми трекера.

Після того, як схема була повністю зібрана, можна приступити до розробки демонстраційної програми. Розробка ведеться у середовищі Arduino IDE, яка створена спеціально для розробки програм для платформи Arduino.

Робота розпочинається з налаштування сонячної панелі, її положення відносно сонця.

```
#include <Servo.h> // include Servo library
Servo horizontal; // horizontal servo
int servoh = 90; // stand horizontal servo
Servo vertical // vertical servo
int servov = 90; // stand vertical servo
```

Далі необхідно налаштувати 4 фоторезистора для подальшого використання.

```
// LDR pin connections
// name = analogpin;
int ldr1t = 0; //LDR top left
int ldr1r = 1; //LDR top right
int ldr1l = 2; //LDR down left
int ldr1d = 3; //LDR down right
```

Тепер, коли фоторезистори налаштовані, необхідно задати алгоритм для найефективнішого знаходження сонячних променів.

Знаходимо середнє значення по лівій стороні (верхній лівий + нижній лівий) та ділимо навпіл ці значення, аналогічно по правій (верхній та нижній сторонам). Якщо різниця по модулю між лівою і правою стороною більше максимального, то здійснюємо поворот в сторону з великим середнім значенням.

Аналогічно для верхньої та нижньої частини.

```
int avt = (lt + rt) / 2; // average value top
int avd = (ld + rd) / 2; // average value down
int avl = (lt + ld) / 2; // average value left
int avr = (rt + rd) / 2; // average value right
int dvert = avt - avd; // check the difference of top
and down
int dhoriz = avl - avr; // check the difference of left
and right
if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // check if the
difference is in the tolerance else change vertical angle
{
  If (avt > avd)
  {
    Servov = ++servov;
    If (servov > 180)
    {
      Servov = 180; }
    Else if (avt < avd)
    {
      Servov = --servov;
      If (servov < 0)
      {
        Servov = 0; }
      Vertical.write (servov); }
    If (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // check if the
difference is in the tolerance else change horizontal angle
    {
      If (avl > avr)
      {
        Servoh = --servoh;
        If (servoh < 0);
        {
          Servoh = 0; }
        Else if (avl < avr)
        {
          Servoh = ++servoh;
          If (servoh > 180)
          {
            Servoh = 180; }
          }
```

```

Else if (avl == avr)
{
// nothing
}
Horizontal.write (servoh); }
Delay (dtime); }

```

**Висновки.** Наведені вище розрахунки показують, що система стеження виробляє на 57% більше енергії ніж статична. Ця кількість енергії може бути отримана, наприклад, на поверхні Місяця. Сонячні промені, що досягають земної поверхні проходять через товстий шар атмосфери. При урахуванні впливу атмосфери, інсоляція на поверхні Землі виявиться менше.

Трекери не повинні вказувати прямо на сонце, щоб бути ефективними.

Якщо сонячна панель відхилена на 10°, отримана потужність залишається на рівні 98,5% від максимальної можливої. У дуже хмарних місцях збільшення в річному об'ємі від трекерів може бути нижче 20%. У загальному випадку, річний приріст складає від 30 до 40%.

Порівняння між різними системами стеження за сонцем [13, 14, 15] показали, що збільшення річного вироблення енергії за допомогою двохосового трекера і одноосового трекера вертикального стеження складало 30% і 18% відповідно. Споживана потужність, обумовлена мікропроцесорами, електроустаткуванням, датчиками, електричними перемикачами і приводами складала 50 Вт·год / добу і 22 Вт·год / добу, при помилці відстежування, що складає  $\pm 0,56^\circ$  і  $\pm 10^\circ$  відповідно.

Найбільш гнучкими і ефективними системами управління трекерними установками є активні та гібридні системи, з причини відсутності недоліків, властивих іншим системам управління. Єдиним недоліком гібридної системи можна вважати підвищену енергоємність системи управління.

#### Список літератури

- Гнедой Н. В. Энергетическая ситуация в Украине / Н. В. Гнедой. // Промышленная энергетика. – 1998. – №5. – С. 10–14, 23.
- Карп И. Н. Эффективность и перспективы использования природного газа в энергетике Украины. / И. Н. Карп, А. В. Степанов. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – №1. – С. 3–9.
- Тонкаль В. Е. Анализ состояния и перспективы развития электроэнергетики Украины / В. Е. Тонкаль, М. Н. Кулик // Анализ Проблемы энергосбережения. – 1995. – №1. – С. 23–32.
- Про національний план дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy/wpcontent/uploads/2017/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- California Institute of Technology. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization; April 18 – 21, 2005.
- Markvart T. Solar electricity, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
- Khlaichom P., Sonthipermpoon K.. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; 2006.
- Walraven R. Calculating the position of the sun. Solar Energy 1977; 20:393
- Roth P., Georgiev A., Boudinov H. Cheap two-axis sun following device. Energy Conversion and Management 2005;46: 1179-92.
- Should you install a solar tracker? [Електронний ресурс] // Tracstar – Режим доступу: <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/> (Дата звернення 29.10.2019).: Загл. з екрану.
- Tomson T.. Discrete two-positional tracking of solar collectors. Renewable Energy 2008;33:400-5.
- Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M. A programmable logic controller to control two axis sun tracking system. Information Technology Journal 2006;5(6): 1083-7.
- JKM250M-60 MONO CRYSTALLINE MODULE [Електронний ресурс] Jinko Solar I Your Best Supplier of Modules, Cells & Wafers – Режим доступу: [https://www.jinkosolar.com/product\\_592.html](https://www.jinkosolar.com/product_592.html) (Дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- Солнечное излучение на наклонной поверхности [Електронний ресурс] PVCDDROM Christiana Honsberg и Stuart Bowden – Режим доступу: <http://pvcddrom.pveducation.org/ru/sunlight/modtilt.htm> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Електронний ресурс] // NASA – POWER – Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/hirestimeser.cgi> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану
- SUNNY BOY 9000TL-US I 10000TL-US I 1 I 1000TL-US [Електронний ресурс] // SMA Solar Technology AG – Inverter, Photovoltaics solutions – Режим доступу: <https://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunnyboy-9000tl-us-10000tl-us-1000tl-us.html> (Дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- Software [Електронний ресурс] // PVsyst. Photovoltaic software – Режим доступу: <http://www.pvsyst.com/en/software> (Дата звернення 29.10.2019). Загл. з екрану.
- Приложение II. Высота солнца над горизонтом [Електронний ресурс] // Книга «Земные ландшафты» – Режим доступу: <https://landshafty.jimdo.com/приложение-ii-высота-солнца-над-горизонтом/> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.
- Восход и закат солнца в Харькове / Продолжительность светового дня / Данные за весь год [Електронний ресурс] Погода для туристов. Прогнозы, статистика, анализ – Режим доступу: <https://pogoda.turtella.ru/Ukraine/Kharkov/sun/> (дата звернення 29.10.2019). – Загл. з екрану.

#### References (transliterated)

- Gnedoy N.V. Energy situation in Ukraine / N.V. Gnedoy. // Industrial energy. - 1998. - No. 5. - P. 10–14, 23.
- Karp I. N. The effectiveness and prospects of using natural gas in the energy sector of Ukraine. / I.N. Karp, A.V. Stepanov. // Ecotechnologies and resource saving. - 1999. - No. 1. - P. 3–9.
- Tonkal V. Ye. Analysis of the state and prospects of development of electric energy of Ukraine / V. E. Tonkal, MN Kulik // Analysis of the problems of energy conservation. -1995. - No. 1. - P. 23–32.
- About the national plan of diverted energy for the period until 2020 [Electronic resource]. Access mode: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80> (the date of the beast October 29, 2019). – screen title.
- Sound of evaluation of the availability (adequacy) of generative needs [Electronic resource]. Access mode: <https://ua.energy/wpcontent/uploads/2017/10/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf> (Corn-up date 10/29/2019). – screen title.
- California Institute of Technology. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization; April 18 – 21, 2005.
- Markvart T. Solar electricity, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons Inc.; 1996.
- Khlaichom P., Sonthipermpoon K.. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; 2006.
- Walraven R. Calculating the position of the sun. Solar Energy 1977; 20:393



10. Roth P., Georgiev A., Boudinov H. Cheap two-axis sun following device. *Energy Conversion and Management* 2005;46: 1179-92.
11. Should you install a solar tracker [Electron resource] // Tracstar – Access mode: <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/> (the date of the beast 29.10.2019). : screen title..
12. Tomson T.. Discrete two-positional tracking of solar collectors. *Renewable Energy* 2008;33:400-5.
13. Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M. A programmable logic controller to control two axis sun tracking system. *Information Technology Journal* 2006;5(6): 1083-7.
14. JKM250M-60 MONO CRYSTALLINE MODULE [Electron resource] Jinko Solar I Your Best Supplier of Modules, Cells & Wafers – Access mode: [https://www.jinkosolar.com/product\\_592.html](https://www.jinkosolar.com/product_592.html) (the date of the beast 29.10.2019). - screen title.
15. Solar radiation on an inclined surface [Electron resource] PVCDDROM Christiana Honsberg and Stuart Bowden - Access mode: <http://pvcddrom.pveducation.org/en/sunlight/modtilt.htm> (the date of the beast 29.10.2019). - screen title.
16. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource [Electron resource] // NASA – POWER – Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/hirestimeser.cgi> (the date of the beast 29.10.2019). – screen title
17. SUNNY BOY 9000TL-US I 10000TL-US I 1 1000TL-US [Electron resource] // SMA Solar Technology AG – Inverter, Photovoltaics solutions Access mode: <https://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunnyboy-9000tl-us-10000tl-us-11000tl-us.html> (the date of the beast 29.10.2019). – screen title.
18. Software [Electron resource] // PVsyst. Photovoltaic software – Electron resource: <http://www.pvsyst.com/en/software> (the date of the beast 29.10.2019). screen title.
19. Appendix II. The height of the sun above the horizon [Electronic resource] // Book “Terrestrial landscapes” - Access mode: <https://landschafty.jimdo.com/application-ii-height-of-the-sun-over-the-horizon/> (date of the brine October 29, 2019).– screen title.
20. Sunrise and sunset in Kharkov / Daylight hours / Data for the whole year [Electronic resource] Weather for tourists. Forecasts, statistics, analysis - Access mode: <https://pogoda.turtella.ru/Ukraine/Kharkov/sun/> (date of death of October 29, 2019). - screen title.

*Надійшла (received) 06.11.19*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Невлюдов Ігор Шакирович (Невлюдов Игорь Шакирович, Nevlyudov Ihor)** – доктор технічних наук, професор кафедри «Комп’ютерно-інтегровані технології автоматизації та мехатроніки», Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: igor.nevlyudov@nure.ua

**Письменецький Віктор Олександрович (Письменецкий Виктор Александрович, Pismenetsky Viktor)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комп’ютерно-інтегровані технології автоматизації та мехатроніки», Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: viktor.pysmenetskyi@nure.ua

**Григор’єва Ольга Володимирівна (Григорьева Ольга Владимировна, Grigorieva Olga)** – старший викладач кафедри «Проектування та експлуатації електронних апаратів», Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: olha.hryhorieva@nure.ua

**Сікало Олександр Сергійович (Сикало Александр Сергеевич, Sikalo Oleksandr)** – студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: oleksandr.sikalo@nure.ua

**Сук Давид Олексійович (Сук Давид Алексеевич, Suk Davyd)** – студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: davyd.suk@nure.ua

УДК 621.771.63

**Ю.А. ПЛЕСНЕЦОВ****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ**

При производстве гнутых профилей скоростной режим технологического процесса оказывает существенное влияние на качество поверхности готовых профилей, износ рабочих валков, энергозатраты, величины крутящих моментов и распределение их между верхним и нижним валками. Полученные расчетно-экспериментальные зависимости кинематики процесса профилирования обеспечили разработку новых технологических процессов с минимальным перепадом скоростей в калибрах валков и оборудования с оптимальными энергозатратами на формовку. Установлено, что при профилировании уголкового, швеллерного и z-образного профилей достаточно усилия, создаваемого приводом только нижнего валка. Применение неприводных верхних валков позволяет: уменьшить суммарный крутящий момент в рабочих клетях на 14...20%, снизить энергетические затраты на профилирование, а также потери на трение, уменьшить износ валков. Исследованиями скоростного режима профилирования на станах с передаточным отношением между основными диаметрами верхнего и нижнего валков больше единицы установлено, что верхний валок в большинстве случаев тормозит перемещение профиля со скоростью, соответствующей линейной скорости по окружностям основных диаметров.

**Ключевые слова:** гнутые профили, скоростной режим профилирования, качество поверхности профилей, износ рабочих валков, энергозатраты.

**Ю.О. ПЛЕСНЕЦОВ****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОФІЛЮВАННЯ**

При виробництві гнутих профілів швидкісний режим технологічного процесу істотно впливає на якість поверхні готових профілів, знос робочих валків, енерговитрати, величини обертових моментів і розподіл їх між верхнім і нижнім валками. Отримані розрахунково-експериментальні залежності кінематики процесу профілювання забезпечили розробку нових технологічних процесів з мінімальним перепадом швидкостей в калібрах валків і обладнання з оптимальними енерговитратами на формування. Встановлено, що при профілюванні кутових, швелерних і z-подібних профілів досить зусилля, створюваного приводом тільки нижнього валка. Застосування неприводних верхніх валків дозволяє: зменшити сумарний крутний момент в робочих клітках на 14... 20%, знизити енергетичні витрати на профілювання, а також втрати на тертя, зменшити знос валків. Дослідженнями швидкісного режиму профілювання на станах з передавальним відношенням між основними діаметрами верхнього і нижнього валків більше одиниці встановлено, що верхній валок в більшості випадків гальмує переміщення профілю зі швидкістю, що відповідає лінійній швидкості по колах основних діаметрів.

**Ключові слова:** гнуті профілі, швидкісний режим профілювання, якість поверхні профілів, знос робочих валків, енерговитрати.

**YU.A. PLESNETSOV****EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SPEED PROFILING MODE**

In the production of bent profiles, the high-speed process mode has a significant impact on the surface quality of finished profiles, wear of work rolls, energy consumption, torque values and their distribution between the upper and lower rolls. The obtained calculated and experimental dependences of the kinematics of the profiling process provided the development of new technological processes with a minimum speed difference in the calibers of rolls and equipment with optimal energy consumption for molding. It has been established that when profiling angle, channel and z-shaped profiles, the effort created by the drive of the lower roll alone is sufficient. The use of non-driven upper rolls allows you to: reduce the total torque in the working stands by 14...20%, reduce energy costs for profiling, as well as friction losses, reduce wear of the rolls. Investigations of the high-speed profiling mode on mills with a gear ratio between the main diameters of the upper and lower rolls more than one have established that the upper roll in most cases slows down the movement of the profile at a speed corresponding to linear speed along the circles of the main diameters.

**Key words:** bent profiles, high-speed profiling mode, surface quality of profiles, wear of work rolls, energy consumption.

**Введение.** При производстве гнутых профилей скоростной режим технологического процесса оказывает существенное влияние на качество поверхности готовых профилей, износ рабочих валков, энергозатраты, величины крутящих моментов и распределение их между верхним и нижним валками.

Для конструкции профилегибочных станов промышленного назначения обычно рабочие валки изготавливают составными, т.е. состоящими из рабочего вала и укрепленных на нем профильных дисковых элементов. Такие валки наиболее удобны в эксплуатации и экономичны. Основные диаметры нижних валков принимают минимальных размеров из условий прочности вала и профильных дисковых элементов валка.

**Актуальность работы.** Основные диаметры верхних валков определяют при проектировании стана для заданного сортамента профилей с учетом размещения в верхних валках переходных форм профилируемых полос максимальной высоты. Полученные таким образом размеры диаметров

валков и их соотношение сохраняют постоянными независимо от формы и размеров профиля [1–5].

Рабочие ручьи валков могут выполняться с углами или участками освобождения и без них. В конструкции ручьев без углов освобождения ( $\alpha_H = \alpha_B$ ) обеспечивается равномерный зазор по всей ширине ручья в плоскости осевого сечения валков. При этом с увеличением высоты формовки профилируемой полосы значительно увеличивается ее относительное скольжение в валках, энергетические потери на трение, ухудшается качество профиля и т.д. Ввиду этого данная конструкция ручьев не получила широкого распространения и применяется для производства профилей небольшой высоты, когда требуется отформовать определенные элементы переходных форм профиля, и в некоторых других случаях. Выполнение рабочих ручьев с участками или углами освобождения частично уменьшает указанные

© Ю.А. Плеснецов, 2019

недостатки вследствие увеличения зазоров в местах с большим относительным скольжением между профилируемой полосой и валками.

В настоящее время оптимальный скоростной режим профилирования выбирают из условия равенства окружных скоростей пары валков в местах основных диаметров. Это условие обеспечивают специально подобранным передаточным отношением цилиндрической пары шестеренной клетки, которое определяется при проектировании стана и принимается равным отношению основных диаметров рабочих валков соответствующих клеток. Вместе с тем, при освоении производства новых технологических процессов производства гнутых профилей

**Цель и задачи работы.** Исследования скоростного режима профилирования. В задачи работы входило: получение расчетно-экспериментальных зависимостей кинематики процесса профилирования, определение влияния скоростного режима профилирования на износ элементов валков.

**Методика исследования.** Для исследования скоростного режима профилирования была сконструирована и изготовлена дифференциальная шестеренная клетка, позволяющая создавать оптимальные силовой и скоростной режимы профилирования. С помощью дифференциального узла подводимый к валкам крутящий момент распределялся пропорционально передаточному отношению  $i=2,5$  конических пар шестерен. Это передаточное отношение принято из условия его равенства отношению основных диаметров валков  $i=D_{в.о}/D_{н.о}=2,5$ .

Дифференциальный узел обеспечивает пропорциональное распределение крутящего момента к валкам независимо от частоты вращения и дает возможность провести процесс профилирования в оптимальном силовом и скоростном режиме, что является важнейшим фактором улучшения качества продукции, снижения энергетических потерь и износа валков.

При формовке в валках усилие, обеспечивающее продольное перемещение профиля, создается совместным воздействием на полосу обоих валков. Это усилие является суммой горизонтальных проекций равнодействующих со стороны каждого валка, приложенных к профилируемой полосе:

$$Q=Q_1+Q_2, \quad (1)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – горизонтальные проекции равнодействующих соответственно со стороны верхнего и нижнего валков.

Соотношение между крутящими моментами на верхнем и нижнем валках определяется передаточными отношениями конических пар шестеренной клетки с дифференциальным узлом  $M_1=iM_2$ .

Последовательное увеличение высоты профиля от клетки к клетке сопровождается перемещением мест приложения равнодействующих в сторону верхнего

валка. Линии действия сил  $Q_1$  и  $Q_2$  поднимаются кверху, т. е. расстояние от линии действия горизонтальной составляющей со стороны верхнего валка до оси верхнего валка  $R_в$  уменьшается, а расстояние от линии действия горизонтальной составляющей со стороны нижнего валка до оси нижнего валка  $R_н$  увеличивается. При этом уменьшение величины  $R_в$  не равно увеличению  $R_н$ . Горизонтальная составляющая, приложенная со стороны верхнего валка  $Q_1$ , увеличивается, а со стороны нижнего валка  $Q_2$  – уменьшается.

Частота вращения верхнего валка  $n_в$  и угловая скорость  $T_в$  с увеличением высоты формируемой полосы вследствие уменьшения радиуса приложения действующих сил увеличиваются, а нижнего валка вследствие увеличения радиуса приложения сил уменьшаются. В рабочей клетке с пропорциональным распределением крутящих моментов по валкам оптимальный процесс профилирования обеспечивается изменением соотношения их частоты вращения без нарушения силового контакта валков и полосы. Полученные таким образом фактические передаточные отношения являются оптимальными при формовке данного профиля:

$$i = n_н/n_в. \quad (2)$$

Ряд средних по клеткам фактических отношений частот вращений при последовательном профилировании в рабочей клетке с дифференциальным приводом профилей всего сортамента стана следует рекомендовать при проектировании вновь строящихся станов. Шестеренные клетки этих станов должны иметь цилиндрические пары шестерен с передаточным отношением, соответствующим среднему фактическому отношению частот вращений валков, полученному в клетке дифференциальным приводом.

Экспериментально катающие диаметры верхнего валка определялись методом кернов, сущность которого заключается в нанесении валками отпечатков (кернов) на профилируемую полосу. Катающий диаметр верхнего валка определялся по замерам на полосе расстояний между кернами  $L_к$  за один оборот валка  $n_в=1$  по формуле

$$D_{к.в}=L_к/(p n_в). \quad (3)$$

Для определения катающего диаметра нижнего валка применяли специально изготовленную измерительную установку (рис. 1), с помощью которой устанавливали отношения чисел оборотов верхнего и нижнего валков.

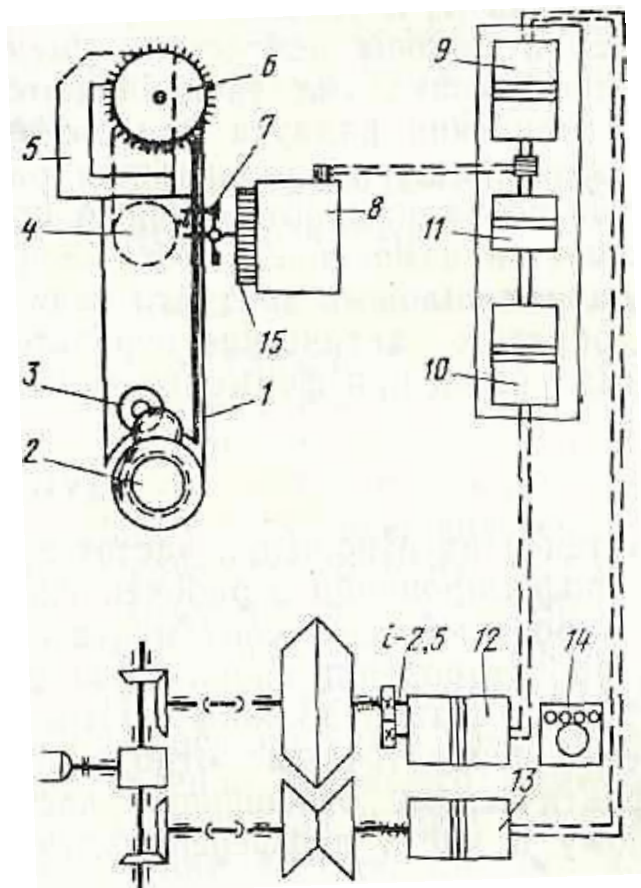


Рис. 1 – Схема измерительной установки для определения отношения чисел оборотов валка

В основу измерительной установки была положена следящая система, смонтированная на контактных сельсинах. Следящая система, будучи многообходным устройством, позволяет передавать любую требуемую частоту вращения с достаточной точностью (до  $\pm 30'$ ). Сельсинная система состоит из одного датчика и одного или нескольких приемников. По конструкции приемники и датчики совершенно одинаковы и имеют по две обмотки: первичную, создающую пульсирующий поток, ось которого поворачивается вместе с поворотом ротора машины, и вторичную многофазную, в которых наводится э.д.с. от потока, создаваемого первичной обмоткой. При симметричной магнитной системе и включении вторичной обмотки на симметричную нагрузку результирующая сумма потоков, создаваемых токами вторичных обмоток, направлена строго противоположно первичному потоку машины. Таким образом, в этих условиях токи первичной и вторичной обмоток не создают вращающего момента. При повороте оси ротора датчика на определенный угол рассогласования во вторичных цепях системы возникает вращающий момент, стремящийся повернуть ось ротора приемника в положение оси ротора датчика, при котором момент равен нулю и роторы датчика и приемника занимают устойчивое положение относительно друг друга.

В измерительной установке роторы сельсин-датчиков 12 и 13 получают вращение от валков; э.д.с.,

возникающая во вторичных цепях датчиков и приемников 9 и 10, создает крутящий момент, вращающий роторы приемника синхронно вращению валков. Статор сельсин-датчика 11 посажен на вал ротора сельсина 10, а ротор соединен муфтой с ротором сельсина 9. При одинаковой частоте вращения валков, т.е. когда передаточное отношение  $i=2,5$ , что соответствует передаточному отношению конических пар шестеренной клетки, ротор и статор сельсин-датчика 11 вращаются с одинаковой угловой скоростью, не вызывая э.д.с. во вторичных цепях следящей системы сельсин-датчика 11 и сельсин-приемника 8. При этом ротор сельсин-приемника 8, несущий на своем валу перо самописца 7, остается неподвижным.

При изменении отношения частот вращения верхнего и нижнего валков изменяются отношения частот вращения роторов сельсин-датчиков 12 и 13 и сельсин-приемников 9 и 10, что вызывает поворот ротора сельсина 11 относительно его статора. Это в свою очередь вызывает э.д.с. во вторичной цепи сельсин-датчика 11 и приемника 8, под действием которой ротор приемника 8 совместно с пером 7 повернется на угол, пропорциональный изменению отношения частот вращения. На перемещающейся бумажной перфорированной ленте 1 при этом будет производиться отметка перемещения пера 7 самописца.

Лента 1 с рулона 4 подается при помощи зубчатого барабана 2, приводимого во вращение электродвигателем 5. Лента наматывается на барабан 6 с постоянным натяжением от электродвигателя 3. Для включения самописца 7 в момент снятия замеров на корпусе сельсина 8 укреплен кольцевой электромагнит 15. Частоту вращения верхнего валка определяли с помощью специально изготовленного счетчика оборотов 14. Точность отсчетов составляла 0,001 оборота. Конструкция счетчика позволяет включать регистрирующую часть при помощи электромагнитной муфты одновременно с включением электромагнита самописца. Регистрирующие узлы измерительной установки (самописец, счетчик оборотов, осциллограф) включались от одного микровыключателя через систему исполнительных электромагнитных реле. По характеру записанной кривой на равномерно движущейся ленте можно определить рассогласование частот вращения валков. Частоту вращения верхнего валка определяли по счетчику числа оборотов, а нижнего по формуле

$$n_n = i n_b \pm n_1, \quad (4)$$

где  $n_1$  – рассогласование чисел оборотов верхнего и нижнего валков (знак перед  $n_1$  определяется при тарировке).

Катающий диаметр нижнего валка

$$D_{к.н} = \frac{L}{\pi n_n} = \frac{L}{\pi (i n_b \pm n_1)}, \quad (5)$$

где  $L$  – длина исследуемого участка профиля.

Для анализа скоростного режима при профилировании удобно пользоваться отношением фактических катающих диаметров:

$$i_{\phi} = D_{к.с}/D_{к.н} = i \pm (n_1/n_s). \quad (6)$$

Разработанная методика позволила определить характер влияния ширины полки и углов подгибки на величину передаточного отношения и величины катающих диаметров.

Для определения скорости формируемого профиля в стане использовался фотоэлектрический метод измерения.

После каждой рабочей клетки стана устанавливали две фотоэлектрические пары фотодатчик – осветитель. Расстояние между парами было максимально возможным в пределах межклетевого расстояния. Конструкция фотоэлектрического датчика позволяла легко и надежно проводить замеры в условиях повышенной вибрации и влаги (эмульсии) на промышленных станах. Импульсы фотодатчиков, отметчика времени и датчика оборотов распределительного вала регистрировали осциллографом Н-700 (рис. 2). Расстояние на осциллографе между точками 1-2 и 3-4 в масштабе отметчика времени равно времени прохождения передним концом полосы расстояния, на котором установлены пары фотодатчиков в межклетевом пространстве соответственно перед и после рабочей клетки. Зная расстояние  $d$  между парой фотодатчиков и время  $t$  прохождения этого расстояния, можно определить скорость полосы на данном участке:

$$v = d/t. \quad (7)$$

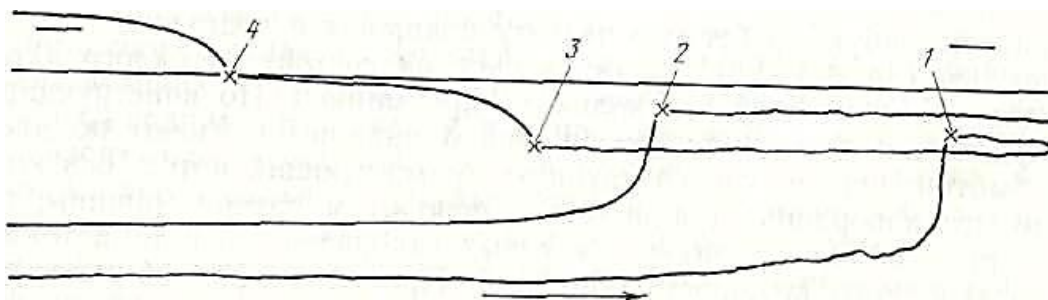


Рис. 2 – Осциллограмма скорости профилируемой полосы: 1-4 – моменты включения фотодатчиков, установленных перед и после клеток стана

Разработанная методика позволила определить особенности скоростного режима профилирования и объяснить характер износа валков и скольжения заготовки в калибрах.

**Результаты исследований скоростного режима профилирования.** Для определения катающих диаметров валков были проведены экспериментальные исследования на рабочей клетке с приводом от дифференциальной шестеренной клетки. В качестве заготовок применялись полосы из стали 08кп толщиной 3 мм, с шириной, необходимой для получения равнобоких уголков с полками 20 мм, 30 мм, 40 мм, 50 мм, 60 мм, 70 мм и 80 мм. На

основании произведенных замеров на дифференциальной клетке в валках с отношением диаметров 2,5 при профилировании уголков по режиму  $0^\circ \rightarrow 8^\circ \rightarrow 18^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 45^\circ$  было установлено, что при формовке в валках с углом подгибки  $8^\circ$  отношение  $n_n/n_b$  с увеличением ширины полки уменьшалось с 2,43 при ширине полок 20 мм до 2,29 при ширине полок 80 мм. Катающий диаметр верхнего валка практически оставался постоянным независимо от изменения ширины подгибаемых полок. Катающий диаметр нижнего валка изменялся более интенсивно. С увеличением суммарного угла подгибки отношения частот вращений нижнего и



верхнего валков и величины катающих диаметров в зависимости от ширины полок уголков изменялись более интенсивно. Так, при суммарном угле подгибки  $45^\circ$  отношение  $n_n/n_v$  уменьшалось с 2,28 при ширине полок 20 мм до 1,63 при ширине полок 80 мм. Катающий диаметр верхнего валка при этом изменялся от 363 мм до 330 мм, нижнего – от 160 мм до 200 мм.

С увеличением суммарного угла подгибки отношение  $n_n/n_v$  уменьшалось. Катающие диаметры верхнего валка уменьшаются, а нижнего увеличиваются. Так, при формовке уголков  $30 \times 30 \times 3$  мм отношение  $n_n/n_v$  уменьшилось с 2,41 при угле подгибки  $8^\circ$  до 2,17 при суммарном угле подгибки  $45^\circ$ . Катающий, диаметр верхнего валка при этом изменялся от 373 мм до 367 мм, нижнего – от 155 мм до 165 мм. Для уголка  $80 \times 80 \times 3$  мм отношение  $n_n/n_v$  изменялось с 2,28 при угле подгибки  $8^\circ$  до 1,63 при суммарном угле подгибки  $45^\circ$ . Величина катающих диаметров при этом изменялась от 373 мм до 300 мм для верхнего валка и от 164 мм до 200 мм для нижнего.

Катающие диаметры валков, соответствующие фактическому скоростному режиму, с увеличением ширины профилируемой полосы и суммарного угла подгибки, изменяются: верхнего – в сторону уменьшения, нижнего – в сторону увеличения по сравнению с основными диаметрами. Это объясняется увеличением высоты переходных форм профилируемых полос, а, следовательно, и перемещением мест контакта полосы с валками в сторону верхнего валка. Отношение  $n_n/n_v$  при это уменьшается. На основании замеров на дифференциальной клетки в валках с отношением диаметров 2,5 при профилировании уголков по режиму  $0^\circ \rightarrow 8^\circ \rightarrow 18^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 45^\circ$  установлены оптимальные передаточные отношения цилиндрических пар шестеренных клеток стана, предназначенного для профилирования уголковых профилей указанных размеров, которые составляют по клетям 2,5; 2,36; 2,36; 2,18; 1,95.

Исследованиями скоростного режима профилирования на станах с передаточным отношением между основными диаметрами верхнего и нижнего валков больше единицы установлено, что верхний валок в большинстве случаев тормозит перемещение профиля со скоростью, соответствующей линейной скорости по окружностям основных диаметров. Вследствие разности скоростей между верхним валком и профилем возникает трение скольжения, что неизбежно приводит к ухудшению качества профиля, повышенному износу валков, увеличению энергетических затрат на профилирование, а в некоторых случаях к поломке деталей рабочей клетки.

При профилировании уголковых, швеллерных и z-образных профилей выяснилось, что для осуществления процесса профилирования во всех случаях достаточно усилия, создаваемого приводом

только нижнего валка. В связи с этим в ряде случаев верхние валки отключались, что обеспечивало одинаковую линейную скорость валков и профиля в местах контакта.

На профилегибочном стане  $2...6 \times 50...500$  при изготовлении швеллеров с размерами  $80 \times 80 \times 3$  мм по режиму  $8^\circ \rightarrow 18^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 44^\circ \rightarrow 58^\circ \rightarrow 70^\circ \rightarrow 80^\circ \rightarrow 90^\circ$  крутящий момент верхнего валка в 2...3 раза меньше нижнего при углах подгибки до  $30^\circ$  и отрицателен или близок к нулю при углах подгибки от  $44^\circ$  до  $90^\circ$ . В то же время катающие диаметры нижнего валка во всех клетях больше основного диаметра на 0,5...1%, верхнего валка – на 0,2...0,8%, т.е. линейная скорость любой точки верхнего валка меньше скорости движения профиля:

- верхний валок тормозит движение профиля;
- нижний валок является ведущим;
- крутящий момент на нижнем валке увеличивается в результате преодоления тормозящего момента верхнего валка.

При профилировании с неприводным верхним валком катающие диаметры нижних валков на 0,5...1% больше основного диаметра, верхних валков – практически равны основному диаметру. Профиль перемещался под воздействием нижнего ведущего валка со скоростью, практически равной линейной скорости по окружности основного диаметра нижнего валка; верхний холостой валок приводился во вращение движущимся профилем. Линейная скорость по окружности основного диаметра верхнего валка практически была равна скорости перемещения профиля.

Суммарный крутящий момент рабочей клетки стана с обычной схемой привода обоих валков состоит из моментов нижнего и верхнего валков, а такой же момент клетки с холостым верхним валком равен крутящему моменту только нижнего валка. При профилировании швеллера  $80 \times 80 \times 3$  мм в валках с суммарными углами подгибки  $44^\circ \rightarrow 58^\circ \rightarrow 70^\circ \rightarrow 80^\circ \rightarrow 90^\circ$  (см. табл. 1) крутящий момент на нижнем валке клетки стана с неприводным верхним валком меньше, чем в клетки стана с обычной схемой привода на 25,4%; 22,3%; 19,5%; 12,4% и 15,6%, соответственно (рис. 3). Это объясняется отсутствием тормозящего момента верхнего валка в схеме привода с холостым верхним валком. В работе получены расчетно-экспериментальные зависимости крутящих моментов при профилировании от суммарных углов подгибки:

- для суммарного крутящего момента, приведенного к нижнему валу (привод верхнего и нижнего валка)

$$M_{кр. сумм} = 0,0123 \alpha_n^3 - 2,4327 \alpha_n^2 + 156,72 \alpha_n - 3147,9;$$

- для крутящего момента нижнего валка с неприводным верхним:

$$M_{кр} = 0,0148 \alpha_n^3 - 2,9104 \alpha_n^2 + 184,59 \alpha_n - 3608,$$

где  $\alpha_n$  – суммарный угол подгибки в  $n$ -ой клетки.

Таблица 1 – Крутящие моменты при профилировании

Привод	Крутящий момент, Нм	Суммарные углы подгибки				
		44°	58°	70°	80°	90°
верхнего и нижнего валков	На нижнем валке	120	220	145	140	260
	На верхнем валке	-15	-35	-5	-7	-12
	Суммарный, приведенный к нижнему валку	144	206	143	137	255
нижнего валка с неприводным верхним	На нижнем валке	85	160	115	120	215

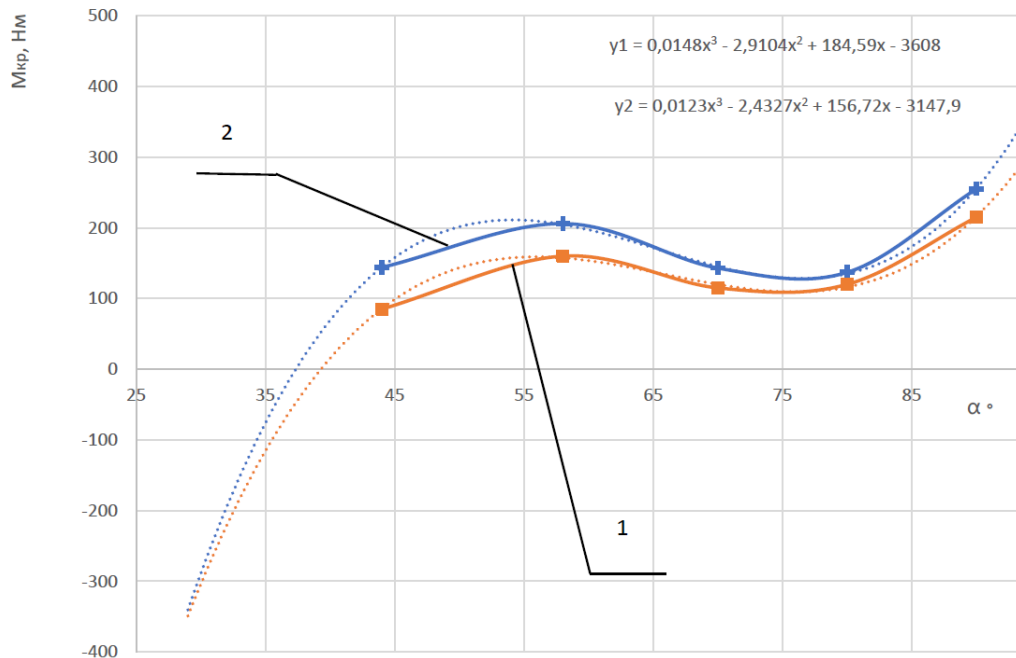


Рис. 3 – Графики и расчетно-экспериментальные зависимости крутящих моментов от углов подгибки: 1 – на нижнем валке (верхний неприводной); 2 – суммарный, приведенный к нижнему валку

Следовательно, применение неприводных верхних валков позволяет:

- уменьшить суммарный крутящий момент в рабочих клетях на 14...20%;
- уменьшить энергетические затраты на профилирование;
- снизить потери на трение;
- уменьшить износ валков.

Результаты анализа износа валков при изготовлении профилей показали, что с увеличением углов подгибки элементов профиля по клетям и, следовательно, глубины вреза калибров в валки создается постоянное увеличение перепада окружных скоростей по высоте рабочих калибров. Участки калибров, наиболее удаленные от основного диаметра валка (формирующие гребни и бурты), изнашиваются в большей степени. В связи с этим, при разработке калибровки валков с целью повышения срока их службы следует:

- принимать радиусы закругления в рабочих калибрах и расчетные размеры по стенке профиля уменьшенными на величину минусового допуска;
- применять углов и участков освобождения в калибрах валков.

**Выводы.** 1. Полученные расчетно-экспериментальные зависимости кинематики процесса профилирования обеспечили разработку

новых технологических процессов с минимальным перепадом скоростей в калибрах валков и оборудования с оптимальными энергозатратами на формовку.

2. Установлено, что при профилировании угольковых, швеллерных и z-образных профилей во всех случаях достаточно усилия, создаваемого приводом только нижнего валка.

3. Применение неприводных верхних валков позволяет: уменьшить суммарный крутящий момент в рабочих клетях на 14...20%, снизить энергетические затраты на профилирование, а также потери на трение, уменьшить износ валков.

4. Исследованиями скоростного режима профилирования на станах с передаточным отношением между основными диаметрами верхнего и нижнего валков больше единицы установлено, что верхний валок в большинстве случаев тормозит перемещение профиля со скоростью, соответствующей линейной скорости по окружностям основных диаметров.



## Список литературы

1. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.
2. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технологии. / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 384 с.
3. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
4. Тришевский И.С. Гнутые профили проката. Справочник / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – М.: Металлургия, 1980. – 352 с.
5. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 128 с.

## References (transliterated)

1. Trishevskij I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutyh profilej prokata / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Kiev: Tehnika, 1980. – 168 p.
2. Trishevskij I.S. Proizvodstvo gnutyh profilej. Oborudovanie i tehnologii. / I.S. Trishevskij, A.B. Yurchenko, V.S. Marin i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 384 p.
3. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 288 p.
4. Trishevskij I.S. Gnutye profili prokata. Spravochnik / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 352 p.
5. Trishevskij I.S. Proizvodstvo detalej iz gnutyh profilej / I.S. Trishevskij, V.S. Marin, V.A. Hmel. – Kiev: Tehnika, 1985. – 128 p.

Поступила (received) 06.09.19

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Плеснецов Юрій Олександрович (Плеснецов Юрий Александрович, Plesnetsov Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: plesnetsov@gmail.com

УДК 004.415.2

**А. Ю. СЛОБОДЧУК, В. О. ПОЗНЯКОВ, К. Л. НОЗДРАЧОВА, Н. М. ЮДАНОВА, В. О. ЯКІМЕНКО**  
**ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ТА РОЗРОБКА МАКЕТУ ПРИБАДУ НА**  
**ОСНОВІ RFID ТЕХНОЛОГІЇ**

Розглянуто основні положення систем контролю і управління доступом (СКУД), сфери діяльності та способи застосування. Описана структурна схема систем СКУД. Наведено можливості застосування RFID технології, класифікація RFID міток та подальший їх розвиток, переваги і недоліки радіочастотної ідентифікації та їх багатопільове використання. Виділено основні міжнародні стандарти в області RFID. Сконструйовано, простіший з існуючих, макет основної частини системи контролю доступу на основі RFID. Проведено порівняльний аналіз сучасних аналогів даного пристрою. Виділено різноманітні пристрої схожі за принципом дії, на основі яких запропоновано вдосконалення даного пристрою. Представлені структурна та принципова схеми, а також алгоритм роботи розробленого макету приладу на основі RFID технології.

**Ключові слова:** система контролю доступу, RFID мітка, зчитувач, ID картка, прилад.

**А. Ю. СЛОБОДЧУК, В. О. ПОЗНЯКОВ, Е. Л. НОЗДРАЧОВА, Н. Н. ЮДАНОВА, В. А. ЯКІМЕНКО**  
**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДОСТУПА И РАЗРАБОТКА МАКЕТА ПРИБОРА**  
**НА ОСНОВЕ RFID ТЕХНОЛОГИИ**

Рассмотрены основные положения систем контроля и управления доступом (СКУД), сферы деятельности и способы применения. Описана структурная схема систем СКУД. Приведены возможности применения RFID технологии, классификация RFID меток и дальнейшее их развитие, преимущества и недостатки радиочастотной идентификации, и их многоцелевое использование. Выделены основные международные стандарты в области RFID. Сконструирован, проще из существующих, макет основной части системы контроля доступа на основе RFID. Проведен сравнительный анализ современных аналогов данного устройства. Выделены различные устройства, схожие по принципу действия, на основе которых предложено совершенствование данного устройства. Представлена структурная и принципиальная схемы, а также алгоритм работы разработанного макета прибора на основе RFID технологии.

**Ключевые слова:** система контроля доступа, RFID метка, считыватель, ID карта, прибор.

**A. Yu. SLOBODCHUK, V. O. POZNYAKOV, K. L. NOZDRACHOVA, N.M. YUDANOVA, V.O. YAKIMENKO**  
**APPLICATION OF ACCESS CONTROL SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF DEVICE MODEL**  
**BASED ON RFID TECHNOLOGY**

The purpose of this work is to understand, to some extent, the performance of RFID based access systems, where they are used and what they are needed for. The basic provisions of access control and management systems, areas of activity and methods of application are considered. The structural diagram of access control systems is described. The possibilities of using RFID technology, the classification of RFID tags and their further development, the advantages and disadvantages of radio frequency identification and their multi-use are given. Highlighted the main international standards in the field of RFID. Designed, simpler from the existing ones, the layout of the main part of the RFID-based access control system. A comparative analysis of modern analogues of this device. Various devices are identified that are similar in principle of operation, on the basis of which the improvement of this device is proposed. The structural and circuit diagrams, as well as the algorithm of the developed device layout based on RFID technology, are presented.

**Keywords:** access control system, RFID tag, reader, ID card, device.

**Вступ.** На даний час розвиток технологій має величезне значення у побуті людини, що, в першу чергу, впроваджує технології у сьогоденні для зручності життя. Найпоширеніша технологія на сьогоднішній день зв'язана з зчитувальними пристроями, що застосовуються у різних сферах діяльності. Системи зчитування розділяються на різноманітні види, в залежності від сфери використання. Наприклад, підприємствам, які мають велику кількість кадрів, потрібно вести облік робочого часу, слідкувати за входом та переміщенням по території підприємства, та у певній мірі підтримувати безпеку певних ділянок підприємства. Як правило в таких ситуаціях впроваджують систему контролю доступу. Таким чином система охоплює великий об'єм робіт, на опрацювання яких було потрібно велика кількість часу та персоналу. Це дає змогу не тільки зменшити витрати, а також скоротити час на опрацювання даних та полегшити роботу діючому персоналу. Також система регулює доступ до різних приміщень, за наявності спеціальних карт, тому ризик потрапляння сторонніх осіб значно зменшується.

**Основні положення.** Система контролю і управління доступом (скорочено СКУД або СКД) – це комплекс технічних та програмних засобів безпеки, що здійснює регулювання входу / виходу та переміщень людей чи транспортних об'єктів на територіях, які знаходяться під охороною, для адміністративного моніторингу та попереджень несанкціонованого проникнення [1].

Основні можливості СКУД – це контроль і управління доступом. Головна функція. Вона дозволяє розділити права доступу співробітників і відмовити в проході небажаним особам. Можлива організація дистанційного керування пристроями для блокування. Можна заборонити прохід співробітникам у вихідні та святкові дні на підприємство, а також після робочої зміни.

**Збір і видача статистики.** Збір інформації система контролю і управління доступом веде постійно. Хто через яку точку пройшов і скільки разів. По кожному із співробітників можна отримати інформацію: час приходу / відходу, спроби доступу в

© А. Ю. Слободчук, В. О. Позняков, К. Л. Ноздрачова,  
 Н. М. Юданова, В. О. Якіменко, 2019

заборонені зони і приміщення, спроби проходу в заборонений час. Можна відстежити, як співробітник переміщається по території, коли проходить СКУД зчитувачі. Всі виявлені дисциплінарні порушення можна занести до особової справи працівника, а керівництво порушника буде проінформовано належним чином.

*Доступ співробітників лише з електронними перепустками.* Працівник, проходячи через пункт пропуску, ідентифікує себе картою, і на екрані монітора охорони може виводитися інформація про співробітника і фотографія теж. Це виключить можливість проникнення під чужим ідентифікатором. У правилах реакції СКУД можна блокувати повторний вхід через пункт пропуску на підприємство по одній карті доступу протягом короткого проміжку часу.

*Облік робочого часу.* СКУД дозволяє вести облік робочого часу, базуючись на оцінках приходу і відходу зі свого робочого місця людей. В результаті можна обчислити сумарний робочий час співробітника з урахуванням «перекурів», обідів та ін. А на початку робочого дня вона може формувати звіт про працівників, які не пройшли контрольну точку в зазначений час, що дозволить виявити тих, хто запізнився або які не вийшли на роботу. За аналогією можна створити звіт і в кінці робочої зміни.

*Автономність роботи системи.* Оснащена безперебійним живленням, СКУД не припинить свою роботу при централізованому відключенні електрики. Крім того, завдяки функціоналу контролера, вона може продовжувати роботу і при зупинці керуючого комп'ютера.

*Охорона в реальному часі.* Система контролю управління доступом СКУД надає можливість знімати і ставити певні приміщення під охорону. І можна отримувати відомості в реальному часі про позаштатних ситуаціях через організовану систему оповіщення через відповідальних осіб. А також тривожні події фіксуються в базі, що дозволить переглянути цю інформацію пізніше.

Співробітник охорони, завдяки засобам СКУД, може, не сходячи з робочого місця, управляти турнікетами і дверима, подавати сигнали тривоги. Досить помістити в його комп'ютер поверхові плани будівлі і схеми розташування контрольних точок.

*Управління через Інтернет або з мобільного телефону.* При підключенні СКУД до всесвітньої мережі адміністрація може дистанційно керувати системою і контролювати її роботу.

*Інтеграція з іншими системами.* Пожежна, охоронна сигналізація, відео спостереження прекрасно інтегруються з СКУД. Інтеграція з відео спостереженням забезпечує візуальний контроль над зоною, що охороняється. І дозволяє в найкоротші терміни виявити, по можливості ідентифікувати і заблокувати порушника.

Поєднання з охоронною сигналізацією дозволяє налаштувати спільне реагування на несанкціоноване проникнення. Так можна змусити спрацювати сирену у охорони в кабінеті, запалити тривожну лампу або

просто заблокувати двері в потрібній частині підприємства.

Інтеграція з пожежною сигналізацією життєво необхідна. Це дозволить автоматично розблокувати всі контрольні точки при пожежі. Що істотно спростить евакуацію працівників у критичний період[2].

Впровадження СКУД дозволяє організувати безпеку та контроль об'єктів без залучення великої кількості працівників охорони та стабільну роботу автоматизованих систем у режимі 24/7 (наприклад, банкоматів, які встановлено в окремих приміщеннях відділень)[1].

#### **Обладнання та принцип роботи.**

##### **1) Перегороджуючі пристрої.**

– встановлюються на двері: електрозащипки; електромагнітні замки; електромеханічні замки;  
– встановлюються на проходах / проїздах: шлюзові кабінети; ворота і шлагбауми.

##### **2) Ідентифікатори.** Основні типи виконання –

карточка, брелок, мітка. Є базовим елементом системи контролю доступу, оскільки зберігає код, який служить для визначення прав («ідентифікації») власника. Це може бути Touchmemo, безконтактна карта (наприклад, RFID-мітки), або контактний тип карт із магнітною смугою. В якості ідентифікатора може виступати так само код, що вводиться на клавіатурі, а також окремі біометричні ознаки людини &nbsp; – відбиток пальця, малюнок сітківки або райдужної оболонки ока, тривимірне зображення особи, малюнок капілярних ліній долоні.

Надійність (стійкість до злому) системи контролю доступу в значній мірі визначається типом використовуюваного ідентифікатора: наприклад, найбільш поширені безконтактні карти proximity можуть підробляти в майстернях з виготовлення ключів на обладнанні, що є у вільному продажу. Тому для об'єктів, що вимагають більш високого рівня захисту, подібні ідентифікатори не підходять. Принципово вищий рівень захищеності забезпечують RFID-мітки, в яких код карти зберігається в захищеній області та шифрується.

**3) Контролери.** Це ключовий елемент системи: саме контролер визначає, пропустити чи ні власника ідентифікатора через точку проходу, оскільки зберігає коди ідентифікаторів зі списком прав доступу кожного з них. Коли людина пред'являє (підносить до зчитувального пристрою) ідентифікатор, зчитаний з нього код порівнюється та зберігається в базі, на підставі чого приймається рішення про відкриття точки проходу. Контролер для своєї роботи вимагає електроживлення, тому контролери, як правило, мають власний акумулятор, який підтримує його працездатність від декількох годин до декількох діб на випадок аварії електромережі.

**4) Зчитувачі.** Це пристрій, який отримує («зчитує») код ідентифікатора і передає його в контролер. Варіанти виконання зчитувача залежать від типу ідентифікатора: для «таблетки» – це два електричних контакти (у вигляді «лузи»), для proximity-карти – це електронна плата з антеною в

корпусі, а для зчитування, наприклад, малюнка райдужної оболонки очка до складу зчитувача повинна входити телевізійна камера [3].

**Сфера використання.** 1) Мережеві СКУД. У них всі контролери з'єднані з центральним сервером. Мережеві системи зручні для великих об'єктів (офіси, виробничі підприємства), оскільки керувати навіть десятком дверей, на яких встановлені автономні системи, стає надзвичайно важко. Незамінні мережеві системи в наступних випадках:

- якщо необхідна інформація про події, що відбулися раніше або потрібен додатковий контроль в реальному режимі часу. Наприклад, в мережеві системі існує функція фотоверифікації: на прохідній при піднесенні людиною, що увійшла, ідентифікатора до зчитувача, службовець (вахтер, охоронець) може на екрані монітора бачити фотографію людини, якій в базі даних привласнений даний ідентифікатор, і порівняти із зовнішністю минаючого, що підстраховує від передачі карток іншим людям;

- якщо необхідно організувати облік робочого часу і контроль трудової дисципліни;

- якщо необхідно забезпечити взаємодію (інтеграцію) з іншими підсистемами безпеки, наприклад, відеоспостереженням або пожежною сигналізацією.

У системі мереж з одного місця можна не тільки контролювати події на всій території, що охороняється, а й централізовано керувати правами користувачів, вести базу даних. Мережеві системи дозволяють організувати кілька робочих місць, розділивши функції управління між різними співробітниками і службами підприємства.

У мережевих системах контролю доступу можуть застосовуватися бездротові технології (радіоканали). Використання бездротових мереж найчастіше визначається конкретними ситуаціями: складно або неможливо прокласти дротові комунікації між об'єктами, скорочення фінансових витрат на монтаж точки проходу і т.д. Існує велика

кількість варіантів радіоканалів, проте в СКУД використовуються тільки деякі з них.

- Bluetooth. Даний вид бездротового пристрою передачі даних являє собою аналог Ethernet. Його особливість полягає в тому, що відповідає необхідність прокладати паралельні комунікації для об'єднання компонентів при використанні інтерфейсу RS-485.

- Wi-Fi. Основна перевага даного радіоканалу полягає у великій дальності зв'язку, яка здатна досягати декількох сотень метрів. При цьому скорочуються як тимчасові, так і фінансові витрати на прокладку вуличних комунікацій.

- ZigBee. Спочатку сферою застосування даного радіоканалу була система охоронної та пожежної сигналізації. Дана бездротова технологія працює в не ліцензованому діапазоні 2,45 ГГц.

- GSM. Перевага використання даного бездротового каналу зв'язку &nbsp; – практично суцільне покриття. До основних методів передачі інформації в розглянутій мережі відносяться GPRS, SMS і голосовий канал.

2) Автономні СКУД системи дешевше, простіше в експлуатації, не вимагають прокладки сотень метрів кабелю, використання пристроїв сполучення з сервером, самого сервера. При цьому до мінусів таких систем відноситься неможливість створювати звіти, вести облік робочого часу, передавати й узагальнювати інформацію про події, управлятися дистанційно.

У складі автономної системи контролю доступу використовуються також електронні замки, передають інформацію по бездротових каналах зв'язку: в двері встановлюється механічний замок з електронним управлінням і вбудованим зчитувачем. Замок по радіоканалу пов'язаний з хабом, який вже по проводах обмінюється інформацією з робочою станцією, на якій встановлено програмне забезпечення [3].

**Структурна схема і опис систем контролю і управління доступом.** Структурна схема СКУД приведена на рис. 1.



Рис. 1 – Структурна схема СКУД

Як ключі-носії ознаки (повна аналогія з ключами в звичайному розумінні цього слова) можуть використовуватись карти різних типів: магнітні, "проксимити", або ж сама людина (як носій індивідуальних біологічних ознак), людська пам'ять, що запам'ятовує набір цифр, котрим є PIN-код (індивідуальний код користувача) і ін.

Для знімання інформації з ключів призначені пристрої ідентифікації. Залежно від типу носія,

природно, змінюються і пристрої ідентифікації. Знімання інформації з будь якого вигляду карт здійснюють спеціальні зчитувачі, які використовують ті або інші фізичні принципи. Для знімання інформації про біологічні ознаки людини використовують спеціальні біометричні зчитувачі (термінали), а PIN-код вводиться з клавіатур різних типів.

Інформація, що знімається з ключів, поступає в процесорний блок – контролер, який її обробляє, аналізує, приймає рішення про можливість проходу. Будь-яка система обов'язково має плату, на якій розміщуються мікропроцесор і інші напівпровідникові елементи. Ця плата розташована в окремому блоці-контролері, або вона вставлена прямо в корпус зчитувача. В кожній з цієї архітектури є свої плюси і мінуси. Архітектура контролера, поєднаного зі зчитувачем, стійкіша до обривів мережі, але і менш захищена від зломів, оскільки блок, що приймає рішення, розташований зовні охоронного приміщення.

СКД може взаємодіяти з персональним комп'ютером. У системах досить великої ємності комп'ютер, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, повністю управляє контролерами, збирає, обробляє і архівує інформацію, що поступає з об'єкту, здійснює взаємодію з сигналізацією і охоронним телебаченням.

Найважливішим елементом СКД є периферійне обладнання, оскільки саме воно вступає в безпосередній "фізичний контакт" з користувачем в процесі ідентифікації і аутентифікації його особи.

Для введення ідентифікаторів користувача в СКД застосовуються наступні основні види периферійного устаткування:

- кодонаборні термінали;
- зчитуючі пристрої;
- біометричні термінали; [4].

**RFID можливості і застосування.** RFID (англ. Radio frequency identification) – радіочастотна ідентифікація.

Радіочастотне розпізнавання здійснюється за допомогою закріплених за об'єктом спеціальних міток, що несуть ідентифікаційну інформацію. Цей метод вже став основою побудови сучасних безконтактних інформаційних систем, і має стійку назву RFID-технології [5].

Особливості технології:

– RFID-міткам не потрібен контакт або пряма видимість, дані з мітки можуть бути отримані на відстані.

– RFID-мітки читаються швидко і точно, що дозволяє виконувати велику кількість сканувань.

– RFID-мітки можна використовувати навіть в агресивних середовищах, через бруд, фарбу, пар, воду, пластмасу, деревину, а також використовувати імплантацію в тіло.

– Пасивні RFID-мітки мають фактично необмежений термін експлуатації, мають низьку собівартість.

– RFID-мітки можуть нести велику кількість інформації.

– RFID-мітки легко відстежити на порівняно невеликій відстані: метро, офіси, банки, магазини, зупинки.

– RFID-мітки можуть бути використані як для читання, так і для запису великого обсягу інформації [5].

*Класифікація RFID-міток.* Існує декілька способів систематизації RFID-міток і систем:

- за робочою частотою;
- за джерелом живлення;
- за типом пам'яті.

а) За джерелом живлення

За типом джерела живлення RFID-мітки діляться на: пасивні; активні; напівпасивні.

Пасивні RFID-мітки не мають вбудованого джерела енергії. Електричний струм, що індукується в антені електромагнітним сигналом від зчитувача, забезпечує достатню потужність для функціонування кремнієвого CMOS-чипа, розміщеного в мітці, і передачі у відповідь сигналу.

Комерційні реалізації низькочастотних RFID-міток можуть бути вбудовані в стикер (наклейку) або імплантовані під шкіру.

У 2006 Hitachi виготовила пасивний пристрій, названий  $\mu$ -Chip (мю-чип), розмірами  $0,15 \times 0,15$  мм (не включаючи антену) і тонше за паперовий лист (7.5 мкм). Такого рівня інтеграції дозволяє досягти технологія «кремній-на-ізоляторі» (SOI).  $\mu$ -Chip може передавати 128-бітовий унікальний ідентифікаційний номер, записаний в мікросхемі на етапі виробництва. Цей номер не може бути змінений надалі, що гарантує високий рівень достовірності і означає, що цей номер буде жорстко прив'язаний (асоційований) з тим об'єктом, до якого приєднується або в який вбудовується цей чип.  $\mu$ -Chip від Hitachi має типовий радіус зчитування 30 см (1 фут). У лютому 2007 року Hitachi представила RFID-пристрій, що має розміри  $0,05 \times 0,05$  мм, і завтовшки, достатньою для вбудовування в лист паперу.

У наш час основна проблема RFID-пристроїв полягає в тому, що для них потрібна зовнішня антена, яка за розмірами перевершує чип у найкращому разі в 80 разів. Найменша вартість RFID-міток, які стали стандартом для таких компаній, як Wal-Mart, DOD, Target, Tesco у Великій Британії і Metro AG в Німеччині, становить приблизно 5 центів за мітку фірми Smart Code. До того ж, через розкид розмірів антен, і мітки мають різні розміри – від поштової марки до листівки. На практиці максимальна дистанція зчитування пасивних міток варіюється від 10 см (4 дюймів) (згідно зі стандартом ISO 14443) до декількох метрів (стандарті EPC і ISO 18000-6), залежно від вибраної частоти і розмірів антени. В деяких випадках антена може бути виготовлена друкарським способом.

Виробничі процеси від Alien Technology під назвою Fluidic Self Assembly, від Smart Code – Flexible Area Synchronized Transfer (FAST) і від Symbol Technologies PICA направлені на подальше зменшення вартості міток за рахунок застосування масового паралельного виробництва. Alien Technology в наш час використовує процеси FSA і HiSam для виготовлення міток, тоді як PICA процес від Symbol Technologies знаходиться ще на стадії розробки. Процес FSA дозволяє проводити понад 2 мільйони IC пластин в годину, а PICA процес – понад 70 мільярдів міток в рік (якщо його

допрацюють). У цих технічних процесах ІС приєднуються до пластин міток, які у свою чергу приєднуються до антен, утворюючи готовий чип. Приєднання ІС до пластин і надалі пластин до антен – просторово найчутливіші елементи процесу виробництва. Це означає, що при зменшенні розмірів ІС монтаж (англ. Pickandplace) стане найдорожчою операцією. Альтернативні методи виробництва, такі як FSA і HiSam, можуть значно зменшити собівартість міток. Стандартизація виробництва (англ. Industrybenchmarks) приведе до подальшого падіння цін на мітки при їхньому широкомасштабному впровадженні.

Не кремнієві мітки виготовляються з полімерних напівпровідників. В наш час їхньою розробкою займаються декілька компаній в усьому світі. Мітки, що виготовляються в лабораторних умовах і працюють на частотах 13.56 МГц були продемонстровані в 2005 році компаніями POLYIC (Німеччина) і Philips (Голландія). У промислових умовах полімерні мітки виготовлятимуться методом прокатного друку (технологія нагадує друк журналів і газет), внаслідок чого вони будуть дешевші, ніж мітки на основі ІС. Це може закінчитися тим, що для більшості сфер застосування мітки почнуть друкувати так само просто, як і штрих-коди, і вони стануть такими ж дешевими.

Пасивні мітки УВЧ (ультрависокочастотні дециметрові хвилі) і НВЧ (надвисокочастотні сантиметрові і міліметрові хвилі) діапазонів (860–960 МГц і 2,4-2,5 ГГц) передають сигнал методом модуляції відбитого сигналу частоти, що несе (англ. Backscattering Modulation модуляція зворотного розсіяння). Антена зчитувача випромінює сигнал несучої частоти і приймає відбитий від мітки модульований сигнал. Пасивні мітки ВЧ діапазону передають сигнал методом модуляції навантаження сигналу частоти, що несе (англ. Load Modulation модуляція навантаження). Кожна мітка має ідентифікаційний номер. Пасивні мітки можуть містити перезаписувану незалежну пам'ять EEPROM-типу. Дальність дії міток становить 1–200 см (ВЧ-МІТКИ) і 1-10 метрів (УВЧ і НВЧ-мітки).

Активні RFID-мітки володіють власним джерелом живлення і не залежать від енергії зчитувача, унаслідок чого вони читаються на дальній відстані, мають великі розміри і можуть бути оснащені додатковою електронікою. Проте, такі мітки найдорожчі, а у батарей обмежений час роботи. Активні мітки в більшості випадків надійніші (наприклад, здійснюють меншу кількість помилок), ніж пасивні, завдяки особливій сесії зв'язку між міткою і пристроєм зчитування. Активні мітки, маючи власне джерелом живлення, також можуть генерувати вихідний сигнал більшого рівня, ніж пасивні, дозволяючи застосовувати їх в агресивніших для радіочастотного сигналу середовищах: воді (включаючи людей і тварин, які в основному складаються з води), металах (корабельні контейнери, автомобілі), для великих відстаней на повітрі. Більшість активних міток дозволяють передати

сигнал на відстані в сотні метрів при тривалості життя батареї живлення до 10 років. Деякі RFID-мітки мають вбудовані сенсори, наприклад, для моніторингу температури товарів, які швидко псуються. Інші типи сенсорів в сукупності з активними мітками можуть застосовуватися для вимірювання вологості, реєстрації поштовхів/вібрації, світла, радіації, температури і газів в атмосфері (наприклад, етилену).

Активні мітки зазвичай мають набагато більший радіус зчитування (до 300 м) і обсяг пам'яті, ніж пасивні, і здатні зберігати більший обсяг інформації для відправки приймачем. В даний час, активні мітки роблять розмірами не більше звичайної пілюлі і продають за ціною в декілька доларів.

Напівпасивні RFID-мітки, також їх називають напівактивними, дуже схожі на пасивні мітки, але оснащені батареєю, яка забезпечує чип енергоживленням. При цьому дальність дії цих міток залежить тільки від чутливості приймача зчитувача і вони можуть функціонувати на більшій відстані і з кращими характеристиками.

б) За типом використовуваної пам'яті

За типом використовуваної пам'яті RFID-мітки діляться на:

- RO (англ. Read Only) дані записуються тільки один раз, відразу при виготовленні. Такі мітки придатні тільки для ідентифікації. Ніяку нову інформацію в них записати не можна, і їх практично неможливо підробляти.

- WORM (англ. Write Once Read Many) окрім унікального ідентифікатора такі мітки містять блок одноразово записуваної пам'яті, яку надалі можна багато разів читати.

- RW (англ. Read and Write) такі мітки містять ідентифікатор і блок пам'яті для читання/запису інформації. Дані в них можуть бути перезаписані багаторазово[5].

в) За робочою частотою.

Мітки діапазону LF (125–134 кГц).

Пасивні системи даного діапазону мають низькі ціни і в зв'язку з фізичними характеристиками використовуються для підшкірних міток при чіпування тварин і людей. Однак, у зв'язку з довжиною хвилі, існують проблеми зі зчитуванням на великі відстані, а також проблеми, пов'язані з появою колізій при зчитуванні.

Мітки діапазону HF (13,56 МГц).

Системи 13 МГц дешеві, не мають екологічних та ліцензійних проблем, добре стандартизовані, мають широку лінійку рішень. Застосовуються в платіжних системах, логістиці, ідентифікації особистості. Для частоти 13,56 МГц розроблений стандарт ISO 14443 (види А / В). На відміну від Mifare 1K, в даному стандарті забезпечена система диверсифікації ключів, що дозволяє створювати відкриті системи. Використовуються стандартизовані алгоритми шифрування.

Для існуючих в даному діапазоні частот стандартів були знайдені серйозні проблеми в безпеці: була відсутня криптографія у дешевих чипів

карти Mifare Ultralight, введена в експлуатацію в Нідерландах для системи оплати проїзду в міському громадському транспорті OV-chipkaart, пізніше була зламана більш надійна картка Mifare Classic.

Як і для діапазону LF, в системах, побудованих в HF-діапазоні, існують проблеми зі зчитуванням з великих відстаней, зчитування в умовах високої вологості, наявності металу, а також проблеми, пов'язані з появою колізій при зчитуванні.

Мітки діапазону UHF (860-960 МГц)

Мітки даного діапазону мають найбільшу дальність реєстрації, в багатьох стандартах даного діапазону присутні антиколізійні механізми. Орієнтовані спочатку для потреб складської та виробничої логістики, мітки діапазону UHF не мали унікального ідентифікатора. Передбачалося, що ідентифікатором для мітки буде служити EPC-номер (Electronic Product Code) товару, який кожен виробник буде заносити в мітку самостійно при виробництві. Однак скоро стало ясно, що крім функції носія EPC-номера товару добре б покласти на мітку ще й функцію контролю справжності. Тобто виникла вимога, яка суперечить самому собі: одночасно забезпечити унікальність мітки і дозволити виробнику записувати довільний EPC-номер.

Довгий час не існувало чіпів, які б задовольняли цим вимогам повністю. Випущений компанією Philips чіп Gen 1.19 володів незмінним ідентифікатором, але не мав ніяких вбудованих функцій по паролюванню банків пам'яті мітки, і дані з мітки міг вивантажити хто завгодно, що має відповідне обладнання. Розроблені згодом чіпи стандарту Gen 2.0 мали функції паролювання банків пам'яті (пароль на читання, на запис), але не мали унікального ідентифікатора мітки, що дозволяло при бажанні створювати ідентичні клони міток.

Нарешті, в 2008 році компанія NXP випустила два нових чіпа, які на сьогоднішній день відповідають всім вище перерахованим вимогам. Чіпи SL3S1202 і SL3FCS1002 виконані в стандарті EPC Gen 2.0, але відрізняються від всіх своїх попередників тим, що поле пам'яті TID (Tag ID), в яке при виробництві зазвичай пишеться код типу мітки (і він в рамках одного артикулу не відрізняється від мітки до мітки), розбите на дві частини. Перші 32 біта відведені під код виробника мітки і її марку, а другі 32 біта – під унікальний номер самого чіпа. Поле TID – незмінне, і, таким чином, кожна мітка є унікальною. Нові чіпи мають всі переваги міток стандарту Gen 2.0. Кожен банк пам'яті може бути захищений від читання або запису паролем, EPC-номер може бути записаний виробником товару в момент маркування.

У UHF RFID-системах в порівнянні з LF і HF нижче вартість міток, при цьому вище вартість іншого обладнання.

Радіочастотні UHF-мітки ближнього поля

Мітки ближнього поля (англ. UHF Near-Field), яка є безпосередньо радіомітками, а використовуючи магнітне поле антени, дозволяють вирішити проблему зчитування в умовах високої вологості, присутності води і металу. За допомогою даної технології

очікується початок масового застосування RFID-міток в роздрібній торгівлі фармацевтичними товарами (такими, що потребують контролю достовірності, обліку, але при цьому часто містять воду і металеві деталі в упаковці)[6].

*Зчитувачі* – прилади, які читають інформацію з міток і записують в них дані. Ці пристрої можуть бути постійно підключеними до облікової системи, або працювати автономно. Залежно від частотного діапазону мітки, дистанція стійкого зчитування і запису даних може бути різною. Розрізняють стаціонарні та мобільні.

Стаціонарні зчитувачі кріпляться нерухомо на стінах, дверях, рухомих складських пристроях (штабеляторах, навантажувачах). Вони можуть бути виконані у вигляді замку, вмонтовані в стіл або закріплені поряд з конвеєром на шляху проходження виробів.

В порівнянні з мобільними, зчитувачі такого типу зазвичай мають більшу зону читання та потужність, і здатні одночасно обробляти значний потік інформації. Стаціонарні зчитувачі на виробництві інтегруються в інформаційну систему що дозволяє поетапно фіксувати переміщення маркованих об'єктів в реальному часі, або ідентифікувати положення мічених предметів в просторі.

Мобільні зчитувачі володіють порівняно меншою дальністю дії і часто не мають постійного зв'язку з програмою контролю і обліку. Мобільні зчитувачі мають внутрішню пам'ять, в яку записуються дані з прочитаних міток (потім цю інформацію можна синхронізувати з системою обліку) і, як і стаціонарні зчитувачі, здатні записувати дані в мітку (наприклад, інформацію про проведений контроль) [5].

Зробивши підсумки аналізованої літератури можна виділити переваги радіочастотної ідентифікації:

- можливість перезапису. Дані RFID-мітки можуть записуватись і доповнюватись багато разів, тоді як дані на штрих-коді не можуть бути змінені – вони записуються відразу при друку.

- Відсутність необхідності прямої видимості. RFID-зчитувачу не потрібно пряма видимість мітки, щоб вивантажити її дані. Взаємна орієнтація мітки і зчитувача часто не грає ролі. Мітки можуть читатися через упаковку, що робить можливим їх приховане розміщення. Для читання даних мітки досить хоча б ненадовго потрапити в зону реєстрації, переміщуючись, в тому числі, і на досить великій швидкості. Навпаки, зчитувачу штрих-коду завжди необхідна пряма видимість штрих-коду для його читання.

- Більша відстань читання. RFID-мітка може зчитуватися на значно більшій відстані, ніж штрих-код. Залежно від моделі мітки і зчитувача радіус зчитування може становити до декількох сотень метрів. У той же час подібні відстані потрібні не завжди.



– Більший обсяг зберігання даних. RFID-мітка може зберігати значно більше інформації, ніж штрих-код.

– Підтримка читання декількох міток. Промислові зчитувачі можуть одночасно зчитувати безліч (більше тисячі) RFID-міток в секунду, використовуючи так звану антиколізійну функцію. Пристрій зчитування штрих-коду може одноразово сканувати тільки один штрих-код.

– Зчитування даних мітки при будь-якому її розташуванні. З метою забезпечення автоматичного зчитування штрихового коду комітети по стандартам (в тому числі EAN International) розробили правила розміщення штрих-міток на товарній і транспортній упаковці. До радіочастотних міток ці вимоги не відносяться. Єдина умова – перебування мітки в зоні дії зчитувача.

– Стійкість до впливу навколишнього середовища. Існують RFID-мітки, що мають підвищену міцність і опірність жорстким умовам робочого середовища, а штрих-код легко пошкоджується (наприклад, вологою або забрудненням). У тих сферах застосування, де один і той же об'єкт може використовуватися необмежену кількість разів (наприклад, при ідентифікації контейнерів або зворотної тари), радіочастотна мітка виявляється більш прийнятним засобом ідентифікації, так як її не потрібно розміщувати на зовнішній стороні упаковки. Пасивні RFID-мітки мають практично необмежений термін експлуатації.

– Багатоцільове використання. RFID-мітка може використовуватися для виконання інших завдань, крім функції носія даних. Штрих-код не програмується і є лише засобом зберігання даних.

– Високий ступінь безпеки. Унікальне незмінне число-ідентифікатор, що привласнюється мітці при виробництві, гарантує високий ступінь захисту міток від підробки. Також дані на мітці можуть бути зашифровані. Радіочастотна мітка має можливість закрити паролем операції запису і зчитування даних, а також зашифрувати їх передачу. В одній мітці можна одночасно зберігати відкриті і закриті дані [6].

Недоліки радіочастотної ідентифікації:

– Працездатність мітки втрачається при частковому механічному пошкодженні.

– Вартість системи перевищує номінальну вартість системи обліку, заснованої на штрих-кодах.

– Простота самостійного виготовлення. Штрих-код можна надрукувати на будь-якому принтері.

– Схильність до завад у вигляді електромагнітних полів.

– Недовіра користувачів, можливості використання її для збору інформації про людей.

– Встановлена технічна база для зчитування штрих-кодів істотно перевершує за обсягом рішення на основі RFID.

– Недостатня відкритість вироблених стандартів[6].

Порівняльні характеристики RFID з аналогом представлені в таблиці 1 [6].

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики RFID з аналогом

Характеристики технології	RFID	Штрих-код	QR-код
Необхідність в прямої видимості мітки	Читання навіть прихованих міток	Читання без прямої видимості неможливо	Читання без прямої видимості неможливо
Об'єм пам'яті	Від 10 до 512 000 байт	До 100 байт	До 3 072 байт
Можливість перезапису даних і багаторазового використання мітки	Має	Відсутня	Відсутня
Дальність реєстрації	До 100 м	До 4 м	До 1 м
Одночасна ідентифікація декількох об'єктів	До 200 міток в секунду	Неможлива	Залежить від зчитувача
Стійкість до впливів навколишнього середовища: механічному, температурному, хімічному, вологому	Підвищена міцність і стійкість	Залежить від матеріалу, на який наноситься	Залежить від матеріалу, на який наноситься
Термін життя мітки	Більше 10 років	Залежить від способу друку та матеріалу, з якого складається відзначається об'єкт	Залежить від способу друку та матеріалу, з якого складається відзначається об'єкт
Безпека і захист від підробки	Підробити можливо	Підробити легко	Підробити легко

Закінчення таблиці 1

Робота при пошкодженні мітки	Неможлива	Важко	Важко
Ідентифікація об'єктів, що рухаються	Так	Важко	Важко
Схильність перешкод у вигляді електромагнітних полів	Має	Немає	Немає
Ідентифікація металевих об'єктів	Можлива	Можлива	Можлива
Використання як стаціонарних, так і ручних терміналів для ідентифікації	Так	Так	Так
Можливість введення в тіло людини або тварини	Можлива	Важко	Важко
Габаритні характеристики	Середні і малі	Малі	Малі
Вартість	Середня	Низька	Низька

Міжнародні стандарти RFID, як складової частини технології автоматичної ідентифікації, розробляються і приймаються міжнародною організацією ISO спільно з IEC. Підготовка проектів (розробка) стандартів проводиться в тісній взаємодії з ініціативними зацікавленими організаціями і компаніями.

#### 1) Організації-розробники стандартів

EPCglobal (спільне підприємство GS1 і GS1 US) працює за міжнародними стандартами в галузі використання RFID і EPC, з метою створити можливість ідентифікації будь-якого об'єкта в ланцюзі постачань товарів компаній у всьому світі.

Одна з місій EPCglobal полягає в упорядкуванні великої кількості RFID-протоколів, що з'явилися в світі починаючи з 1990-х років і створенні єдиного протоколу для реалізації прориву в сприйнятті RFID комерційними організаціями.

AIM global – міжнародна торгова асоціація, що представляє постачальників автоматичної ідентифікації та мобільних технологій. Асоціація активно підтримує розвиток AIM стандартів за рахунок власного Technical Symbology Committee, Global Standards Advisory Groups і групи експертів RFID, а також через участь в промислових, національних (ANSI) і міжнародних (ISO) групах розробок.

GRIFS – дворічний проект зі створення Форуму сумісності стандартів RFID координується GS1 спільно з ETSI і CENI. Проект фінансується Європейським співтовариством. Почав свою діяльність в січні 2008 року. В рамках даного проекту проведено три конференції в Токіо, Гонконгу і Брюсселі в 2008-2009 роках.

EPC Gen2 – скорочення від «EPCglobal Generation 2».

Розподіл міток на класи було прийнято задовго до появи ініціативи EPCglobal, проте не існувало загальноприйнятого протоколу обміну між зчитувачами і мітками. Це призводило до несумісності зчитувачів і міток різних виробників. У

2004 р. ISO / IEC прийняла єдиний міжнародний стандарт ISO 18000, що описує протоколи обміну (радіоінтерфейси, англ. Airinterface) у всіх частотних діапазонах RFID від 135 кГц до 2,45 ГГц. Діапазону УВЧ (860-960) МГц відповідає стандарт ISO 18000-6A / B. З урахуванням технічних проблем, які проявлялися при зчитуванні міток класів 0 і 1 першого покоління, в 2004 р. фахівці Hardware Action Group EPCglobal створили новий протокол обміну між зчитувачем і міткою УВЧ діапазону – Class 1 Generation 2. У 2006 р. пропозиція EPC Gen2 з незначними змінами було прийнято ISO / IEC як доповнення 3 до існуючих варіантів А і в стандарту ISO 18000-6, і на даний момент стандарт ISO / IEC 18000-6С є найбільш поширеним стандартом технології RFID в УВЧ діапазоні. Цей стандарт був затверджений всупереч претензіям компанії Intermec про те, що його прийняття може порушити ряд їх патентів, пов'язаних з RFID. Було вирішено, що стандарт сам по собі не порушує патентів, однак при певних обставинах у виробників може виникнути необхідність платити мита Intermec.

Сучасні мітки стандарту Gen2 використовують ефективний антиколізійний механізм, заснований на розвинутій технології «слотів» – багатосесійність управління станом міток під час «інвентаризації», – тобто, зчитуванні міток в зоні реєстрації. Даний механізм дозволяє збільшити швидкість зчитування-інвентаризації міток до 1500 міток/с. (запис – до 16 міток / с.) при використанні промислових портальних зчитувачів, наприклад, компанії Impinj. Зчитувач і мітки на початку запиту генерують число  $q$  в діапазоні від 0 до 2 певною мірою  $n$ . Якщо число  $q$  зчитувача і однією з міток співпало, то вони проводять обмін інформацією. Якщо ж кількість відгукнулися міток не дорівнює одиниці, то зчитувач виробляє новий запит, при якому число  $q$  генерується заново. У разі, якщо часто виникає ситуація, в якій не стався обмін інформацією з міткою (тобто якщо міток занадто багато або занадто мало в порівнянні з діапазоном, в якому лежить число  $q$ ), зчитувач коригує ступінь двійки  $n$ , змінюючи межі діапазону.

Даний алгоритм працює набагато швидше алгоритму, який використовується в Gen1, так як в першому випадку зчитувач побітно перебирає до 64 біт, а в другому працює теорія ймовірності і є механізм регулювання.

Крім того, Gen2 мітки дозволяють ефективно використовувати в перекриваючих і близьких зонах кілька зчитувачів одночасно (технологія англ. Multiple Reader Mode) за рахунок рознесення один від одного частотних каналів зчитувачів[6].

Станом на 2008 рік в якості міжнародного стандарту в області RFID виступає різне безліч стандартів описують різні області RFID:

- ISO 11784 – «Радіочастотна ідентифікація тварин – Структура кодів»
- ISO 11785 – «Радіочастотна ідентифікація тварин – Технічна концепція»
- ISO 14223 – «Радіочастотна ідентифікація тварин – Транспондери з розширеними функціями»
- ISO 10536 – «Карти ідентифікаційні. Безконтактні чіпові карти»
- ISO 14443 – «Карти ідентифікаційні. Безконтактні чіпові карти. Карти з малою відстанню зчитування»
- ISO 15693 – «Карти ідентифікаційні. Безконтактні чіпові карти. Карти середньої дальності зчитування»

- DIN / ISO 69873 – «Носії даних для інструменту і затискних пристроїв»
- ISO / IEC 10374 – «Ідентифікація контейнерів»
- VDI 4470 – «Системи охорони товарів»
- ISO 15961 – «RFID для управління товарами: керуючий комп'ютер, функціональні команди міток і інші синтаксичні можливості»
- ISO 15962 – «RFID для управління товарами: синтаксис даних»
- ISO 15963 – «Унікальна ідентифікація радіочастотних міток і реєстрація власника для управління унікальністю»
- ISO 18000 – «RFID для управління товарами: бездротовий інтерфейс»
- ISO 18001 – «Інформаційні технології – RFID для управління товарами – Рекомендовані профілі додатків»[6].

**Розробка макету основного елемента системи на основі RFID.** Розроблений макет приладу складається з RFID зчитувача «RC522», стабілізатора 3,3 В, мікроконтролера ATmega 328P (модуль Arduino), стабілізатора 5 В, реле відкриття замка, реле світлової та звукової сигналізації, блоку живлення.

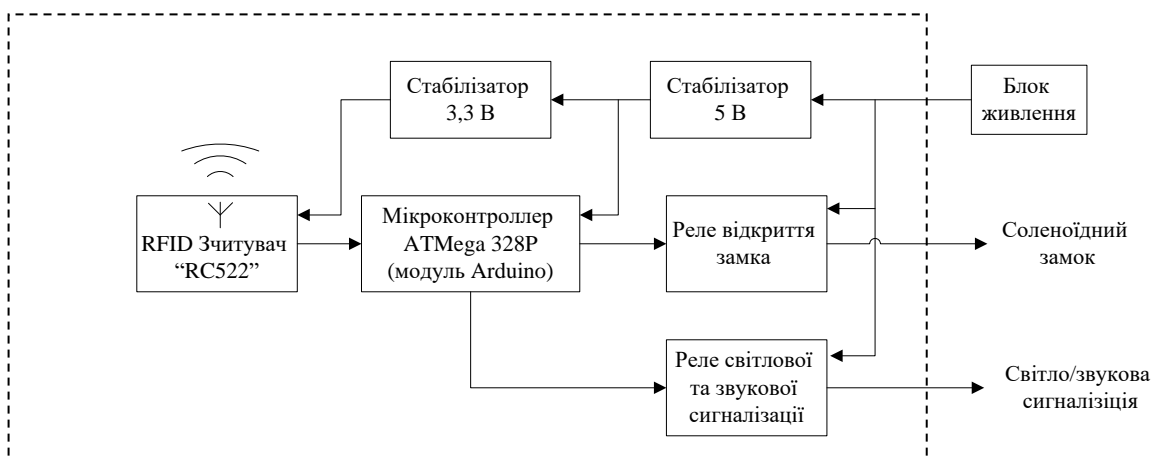


Рис. 2 – Структурна схема макету.

Розроблений макет постійно шукає RFID карту. Якщо карта знайдена, зчитується її ID. Якщо ID карта є в базі даних, пристрій включає реле, що відкриває замок, включає звукове оповіщення і через заданий час вимикає реле і звукове сповіщення. Якщо ID карти в базі даних немає, звучить довгий звуковий сигнал і знову триває пошук RFID карти.

*Алгоритм роботи* (рис. 3). При включенні живлення мікроконтролер в пристрої читає і виконує програму, яка закладена в даній пам'яті. Насамперед він налаштовує пристрої введення / виведення, настроює і запускає сторожовий таймер після чого входить в нескінченний цикл. У нескінченному циклі мікроконтролер опитує службову кнопку. Якщо вона натиснута, то мікроконтролер опитує RFID зчитувач на предмет наявності в полі зчитувача RFID карт. Якщо RFID карти в полі зчитувача немає і службова

кнопка натиснута, то мікроконтролер за допомогою RFID зчитувача продовжує шукати карту. Коли карта знайдена, зчитується її ID номер. Якщо ID номер карти є в базі даних і службова кнопка натиснута то триває пошук інших ID карт. Якщо ж номер ID карти немає в базі даних, то даний номер ID додається в базу даних і звучить короткий звуковий сигнал.

У той момент, коли службова кнопка не була натиснута, мікроконтролер за допомогою зчитувача шукає RFID карту. Якщо карта знайдена, зчитується її ID номер. Якщо ID номер карти є в базі даних, пристрій включає реле, що відкриває замок, включає звукове оповіщення і через заданий час вимикає реле і звукове сповіщення. Якщо ID номеру карти в базі даних немає, звучить довгий звуковий сигнал і знову триває пошук RFID карти.

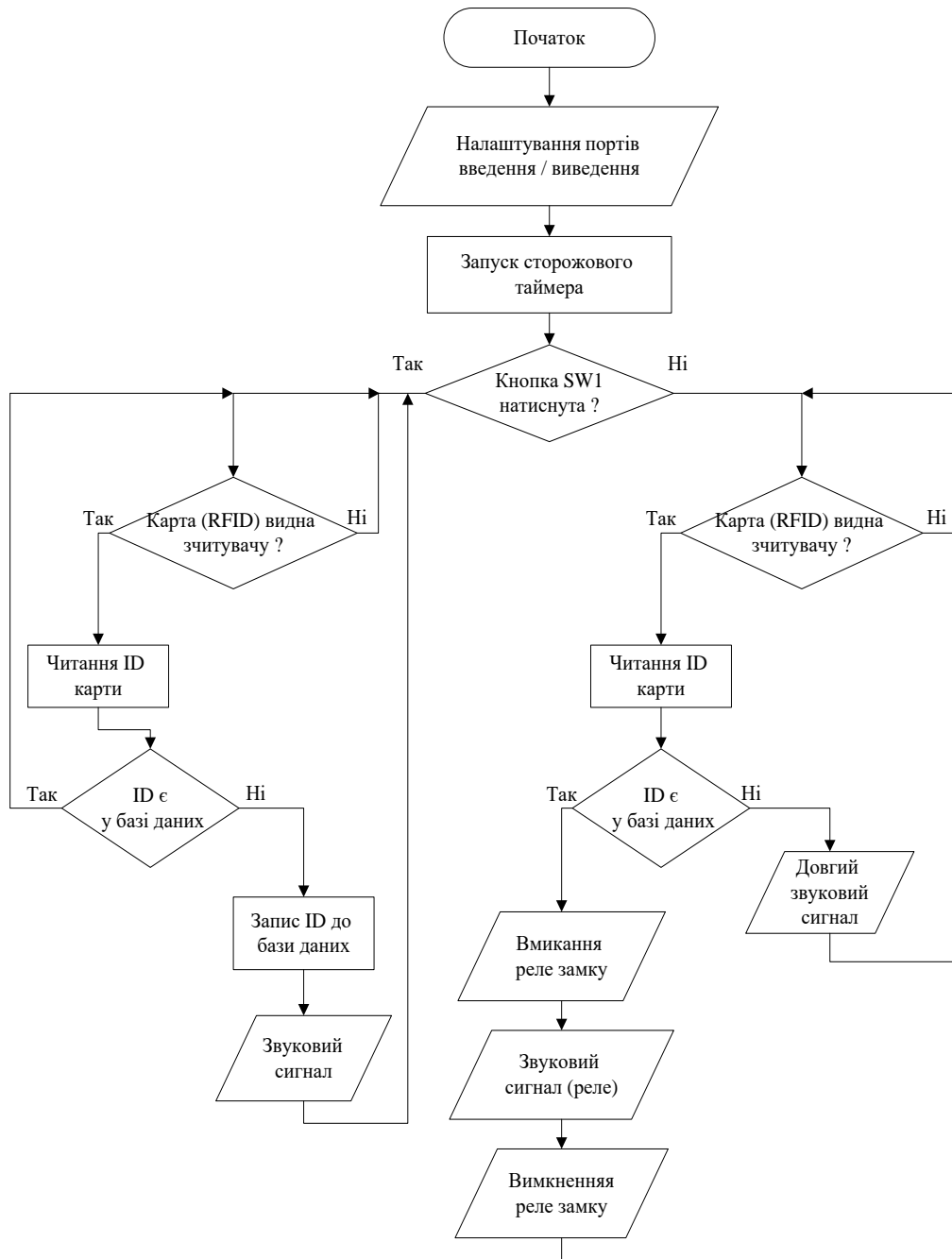


Рис. 3 – Алгоритм роботи пристрою.

Принципова схема макету приладу зображена на рис. 4.

Пристрій живиться постійною напругою 12 В. Конденсатор С4 виконує роль фільтра напруги живлення 12 В. Стабілізатор DA2 знижує вхідну напругу 12 В до рівня 5 В. Даними 5 В живиться DD2. Конденсатор С3 служить фільтром напруги 5 В. Стабілізатор напруги DA1 знижує вхідну в нього напругу 5В до рівня 3,3 В. Конденсатор С2 служить фільтром напруги 3,3 В. Дана напруга 3,3 В живить

DD1. Конденсатор С1 необхідний для послаблення брязкоту контактів SV1. Резистори R1-R3 є струмообмежуючими для баз транзисторів VT1 – VT3, які працюють в ключовому режимі. VT1 включає бузер BZ1. VT2 управляє К1. VT3 управляє К2. Для послаблення викидів ЕРС котушок електромагнітних реле К1, К2 служать діоди VD1, VD2.

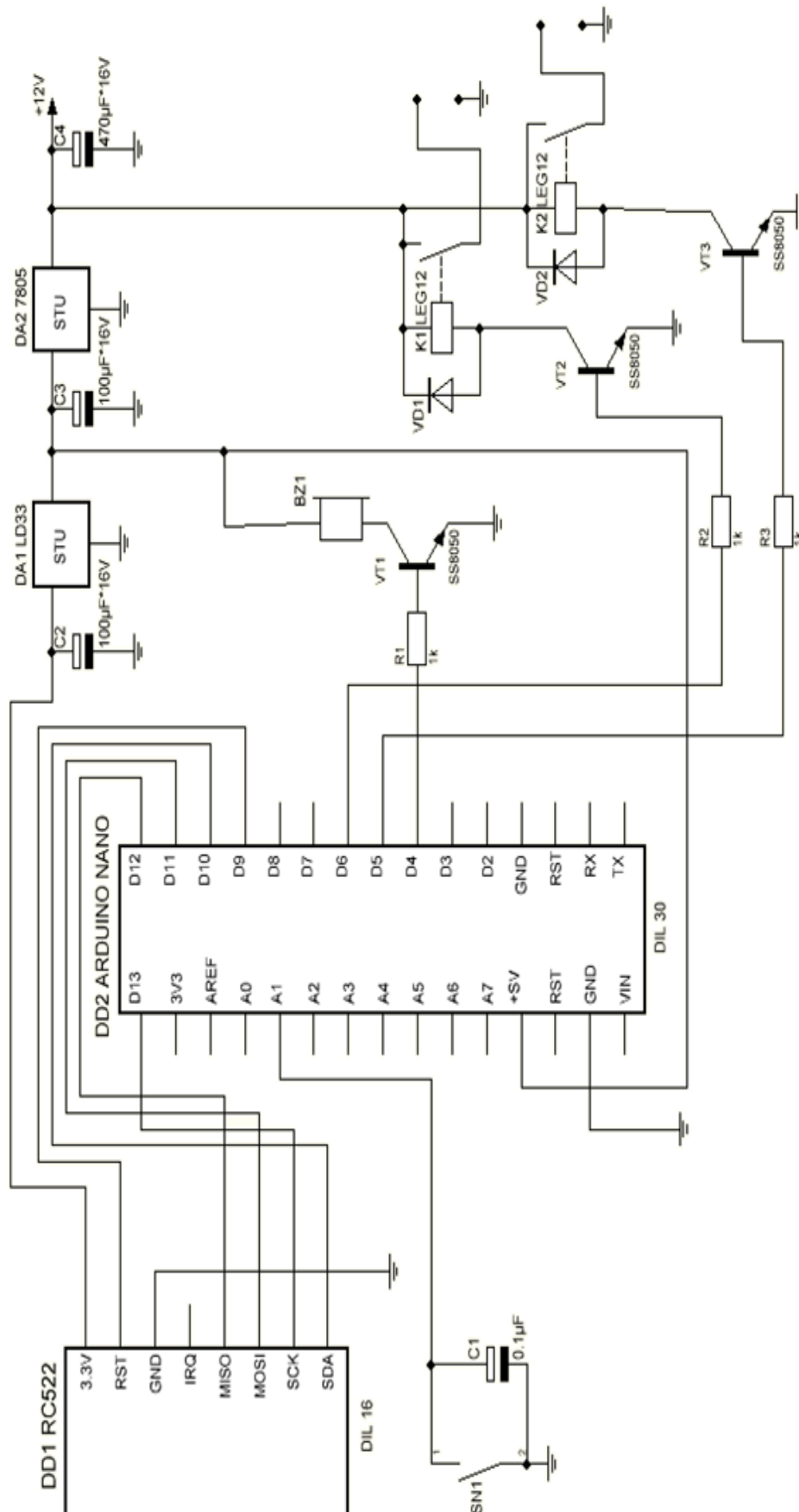


Рис. 4 – Принципова схема пристрою

Фото діючого макету приладу представлено на рис. 5.



Рис. 5 – Діючий макет пристрою

### Висновки

Розглянуті технології, що дозволяють зчитувати, зберігати та обробляти дані, стежити за переміщенням об'єктів, на яких є мітка. Серед них було виділено RFID технологію, яка вважається найбільш поширеною, розвинутою, з більшим потенціалом у розвитку і застосуванні у повсякденному житті. RFID технології набули популярності в охоронній промисловості, на багатьох промислових та комерційних підприємствах, як система яка контролює час перебування та переміщення по робочій території, а також у торговельній сфері, як контроль за переміщенням товару.

Також було розроблено діючий макет приладу на основі RFID технології, особливості якого полягають в більшій доступності в порівнянні з існуючими завдяки підбору більш дешевих та не менш практичних радіоелементів і прошитою для більш вузьких та конкретних задач.

### Список літератури

1. Система контролю і управління доступу [Електронний ресурс] / Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8E\\_%D1%96\\_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D0%BE%D0%BC\\_](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8E_%D1%96_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D0%BE%D0%BC_) – Назва з екрану.
2. Система контролю і управління доступом [Електронний ресурс] / Lovevaquero – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.ilovevaquero.com/tehnologii/108991-skud-eto-sistema-kontrolya-i-upravleniya-dostupom.html>. – Назва з екрану.
3. Системи контролю та управління доступом. Огляд. [Електронний ресурс] / Валтек – Режим доступу до ресурсу: <https://valtek.com.ua/ua/system-integration/security-control-system/access-control/access-control-review>. – Назва з екрану.
4. Системи контролю та управління [Електронний ресурс] / Studfile – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/5157574/page:5/>. Останній доступ : 2016. – Назва з екрану.

5. Радіочастотна ідентифікація [Електронний ресурс] / Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B0\\_%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F). – Назва з екрану.
6. RFID [Електронний ресурс] / Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID>. – Назва з екрану.

### References (transliterated)

1. Sistema kontrolyu i upravlinnya dostupu [Elektronnij resurs] / Vikipediya – Rezhim dostupu do resursu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8E\\_%D1%96\\_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D0%BE%D0%BC\\_](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8E_%D1%96_%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF%D0%BE%D0%BC_). – Nazva z ekranu.
2. Sistema kontrolyu i upravlinnya dostupom [Elektronnij resurs] / Ilovevaquero – Rezhim dostupu do resursu: <https://uk.ilovevaquero.com/tehnologii/108991-skud-eto-sistema-kontrolya-i-upravleniya-dostupom.html>. – Nazva z ekranu.
3. Sistemi kontrolyu ta upravlinnya dostupom. Oglyad. [Elektronnij resurs] / Valtek – Rezhim dostupu do resursu: <https://valtek.com.ua/ua/system-integration/security-control-system/access-control/access-control-review>. – Nazva z ekranu.
4. Sistemi kontrolyu ta upravlinnya [Elektronnij resurs] / Studfile – Rezhim dostupu do resursu: <https://studfile.net/preview/5157574/page:5/>. Ostanij dostup : 2016. – Nazva z ekranu.
5. Radiochastotna identifikaciya [Elektronnij resurs] / Vikipediya – Rezhim dostupu do resursu: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B0\\_%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D1%96%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F). – Nazva z ekranu.
6. RFID [Elektronnij resurs] / Vikipediya – Rezhim dostupu do resursu: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID>. – Nazva z ekranu.

Надійшла (received) 12.10.19



*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Слободчук Антон Юрійович (Слободчук Антон Юрьевич, Slobodchuk Anton Yuryvich)** – аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, email: antonslobodchuk@gmail.com

**Позняков Владислав Олександрович (Позняков Владислав Александрович, Poznyakov Vladislav Alexandrovich)** – магістрант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, email: pozniakov199730@gmail.com

**Ноздрачова Катерина Леонідівна (Ноздрачева Екатерина Леонидовна, Nozdrachova Katerina Leonidivna)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-1996-2301, e-mail: nozdrachova@gmail.com

**Юданова Ніна Миколаївна (Юданова Ніна Николаевна, Udanova Nina Mikolayivna)** – старший викладач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна

**Якіменко Вячеслав Олександрович (Якіменко Вячеслав Александрович, Yakimenko Viacheslav Aleksandrovich)** – бакалаврант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна



УДК 681.586, 621.43

**Ю. О. СМОЛІН****ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ПОКАЗНИКІВ ГАЗООБМІНУ В ДИЗЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Розглянуті особливості вимірювань параметрів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) при проведенні їх досліджень і випробувань, а також вплив газодинамічних процесів. Зазначено, що застосування моделювання процесів дозволяють одержати тільки орієнтовні дані про кількісні оцінки та якість процесів. Показано, що фізичні процеси, які протікають у циліндрі при згоранні робочої суміші, а саме, розширення, випуск, продувка, наповнення, упорскування палива і стиск істотно відрізняються. Доведено, що проби газу з порожнини циліндра можна відбирати тільки на строго обмежених ділянках робочого циклу. Відбір газу повинен бути короткочасним і початок відбору газу із циліндра повинен бути жорстко прив'язаний до якого-небудь моменту робочого циклу двигуна. Наведено структурну схему електронної системи діагностики показників газообміну в дизелі і дано опис її роботи. Наведені основні показники, що характеризують газодинамічні процеси, які протікають в циліндрі ДВЗ. Показано, що проби газу аналізували методом газоабсорбційної хроматографії. Виділені додаткові зміни, які було внесено до хроматографа. Наведені вирази за якими визначалися окремі складові робочих газів. Отримані експериментальні залежності об'ємної концентрації надлишкового азоту, об'ємної концентрації вуглекислого газу, коефіцієнта надлишку повітря та коефіцієнта залишкових газів при роботі двигуна ОД 100 по тепловозній характеристиці.

**Ключові слова:** електронна система діагностики, показники газообміну, газоабсорбційна хроматографія, експериментальні залежності показників газообміну.

**Ю. А. СМОЛИН****ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗООБМЕНА В ДИЗЕЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Рассмотрены особенности измерений параметров двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при проведении их исследований и испытаний, а также влияние газодинамических процессов, происходящих в газоздушных трактах, в процессе продувки и наполнения цилиндров. Отмечено, что применение численного моделирования процессов газообмена и построение различных моделей позволяют получить только ориентировочные данные о количественных оценках и качестве процессов, протекающих в цилиндре двигателя. Показано, что физические процессы, протекающие в цилиндре при сгорании рабочей смеси, а именно, расширение, выпуск, продувка, наполнение, впрыск топлива и сжатие существенно отличаются, как по физической природе, так и по химическому составу. Доказано, что пробы газа из полости цилиндра можно отбирать только на строго ограниченных участках рабочего цикла. Отбор газа должен быть кратковременным и начало отбора газа из цилиндра должно быть жестко привязано к какому-либо моменту рабочего цикла двигателя. Приведена структурная схема электронной системы диагностики показателей газообмена в дизеле и дано описание ее работы. Перечислены параметры и характеристики системы, которые регистрировались в процессе проведения эксперимента и диапазоны числовых значений их возможных изменений. Приведены основные показатели, характеризующие газодинамические процессы, протекающие в цилиндре ДВС. Показано, что пробы газа анализировали методом газоабсорбционной хроматографии. Выделены дополнительные изменения, которые были внесены в хроматограф. Приведены выражения, по которым определялись отдельные составляющие рабочих газов. Полученные экспериментальные зависимости объемной концентрации избыточного азота, объемной концентрации углекислого газа, коэффициента остатка воздуха и коэффициента остаточных газов при работе двигателя ОД 100 по тепловозной характеристике.

**Ключевые слова:** электронная система диагностики, показатели газообмена, газоабсорбционная хроматография, экспериментальные зависимости показателей газообмена.

**Yu. O. SMOLIN****ELECTRONIC DIAGNOSTIC SYSTEM FOR GAS EXCHANGE IN DIESEL AND EXPERIMENTAL RESEARCH RESULTS**

The features of the measurement parameters of the internal combustion engine (ICE) during their research and testing, and the impact of gas dynamic processes occurring in the flowpath during the purge and cylinder filling. It is noted that the use of numerical modeling of gas exchange processes and building a different model gives only an indication of the quantitative evaluation and quality processes that take place in the cylinder. It is shown that the physical processes that occur in a cylinder during combustion mixture, namely, expansion, release blowing, filling, compression and fuel injection differ greatly, both in the physical nature and chemical composition. It is proved that the gas sample from the cavity of the cylinder can be selected only at strictly limited areas of the working cycle. The selection of gas must be short and the beginning of the gas sampling cylinder to be rigidly tied to any point of the engine operating cycle. Shows a block diagram of an electronic diagnostic system gas exchange in a diesel engine, and a description of its operation. Lists the parameters and characteristics of the system, which were recorded in the course of the experiment and the numerical values of the ranges of possible changes. The main indicators characterizing the gas-dynamic processes in an internal combustion engine cylinder. It is shown that the sample was analyzed by gas chromatography gazoabsorbtsionnoy. Allocated additional changes that were introduced into the chromatograph. The expressions of which are determined by the individual components of the working gas. The experimental dependence of the volume concentration of excess nitrogen, the coefficients of residual air and the coefficients of residual gases during the operation of the engine OD 100 by diesel locomotive arrangement.

**Keywords:** electronic diagnostics, gas exchange parameters, gazoabsorbtsionnaya chromatography, depending on experimental parameters of gas exchange.

**Вступ.** Електронна система визначення показників газообміну в дизелі є класичним представником комп'ютерних та радіоелектронних систем діагностики. Двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) взагалі, і дизелі зокрема, належать до числа найбільш складних теплових машин. Процеси, що протікають у них, характеризуються великим числом величин, що одночасно, змінюються, складністю законів їхньої зміни й малих відрізків часу. Із цих причин виміри, проведені при дослідженні й

доведенні дизелів і застосовувані для цих цілей прилади, досить численні й різноманітні. Досить указати, що в практиці науково-дослідних робіт з дизелів доводиться визначати, принаймні, не менш 50 параметрів і певних значень змінних величин, що ставляться до процесів у циліндрі, до динаміки явищ у газових трактах і паливній системі, до характеристик

© Ю. О. Смолін, 2019

міцності, до роботи систем і т.д. [1]. Ці виміри можуть бути виконані для багатьох випадків тільки із застосуванням спеціальних засобів радіоелектроніки, тобто систем контролю та діагностики, які входять до складу автоматизованих систем наукових досліджень (АСНД) двигунів внутрішнього згоряння (АСНД ДВЗ) [2, 3].

Електронна система діагностики, що пропонується, здійснює відбір газів з циліндрів двигуна внутрішнього згоряння. Але ж основним призначенням цієї системи є визначення складу газу з проб газу, що відбиралися з циліндрів ДВЗ. В подальшому аналізувати ці проби можливо за допомогою газоаналізаторів.

**Постановка проблеми.** Газодинамічні процеси, що відбуваються в газоповітряних трактах, істотно впливають на продувку і наповнення, що в свою чергу позначається на техніко-економічних показниках роботи двигуна. Експериментальні дані про показники газообміну дозволяють намітити шляхи вдосконалення цих процесів. Сказане відноситься до процесів, що відбуваються при газообміні в усіх двигунах внутрішнього згоряння, в тому разі і у дизелях.

Застосування чисельного моделювання процесів газообміну на комп'ютері і побудова різних моделей дозволяють одержати тільки орієнтовне, у найкращому разі приблизні дані про якість процесів, що протікають і їхні кількісні оцінки. Тому дані, отримані в результаті експерименту залишаються найбільш достовірними, надійними й точними [4].

Тобто достеменні дані про показники газообміну в циліндрах ДВЗ можна одержати тільки на основі хроматографії проб газу, що отримані експериментально за допомогою спеціалізованих систем діагностики [5].

**Мета роботи.** Створити електронну систему діагностики, що дозволяє відбирати проби газу в циліндрах двигунів внутрішнього згоряння на конкретних ділянках робочого циклу двигуна, з подальшим визначенням об'ємної концентрації окремих компонентів газу в циліндрі ДВЗ на цих ділянках.

**Основна частина.** Вирішуючи експериментальну задачу по відборі проб газу із циліндра працюючого дизеля не можна не враховувати процеси, що протікають у циліндрі. На рис.1 показана розгорнута індикаторна діаграма двотактного дизеля, що представляє собою залежність тиску в циліндрі від положення поршня, вираженого в кутах повороту колінчатого вала (к.п.к.в.) щодо нижньої мертвої точки (н.м.т.).

Максимальний тиск у циліндрах дизеля може досягати  $120\div 130 \text{ кг/см}^2$  у момент згоряння палива й знижуватися нижче атмосферного в режимі випуску й продувки.

Частота обертання сучасних дизелів, залежно від типу й режиму роботи також може істотно змінюватися. Звичайно вона лежить у межах від кількох сотень до декількох тисяч об/хв, і, отже, тривалість одного робочого циклу може змінюватися

від 200 мс у тихохідних дизелів, до 20 мс і менш, у швидкохідних [4].

Таким чином, робочий процес у циліндрі характеризується зміною тисків у широких межах за короткі інтервали часу. Отже, перша похідна за часом, тобто швидкість наростання тиску – велика.

З індикаторної діаграми видно також, що фізичні процеси різноманітні (згоряння, що протікають у циліндрі, розширення, випуск, продувка, наповнення, упорскування палива або робочої суміші, стиск) і істотно відрізняються як по фізичній природі так і по хімічному складі [4,5].

Із проведеного аналізу витікає, що:

- по-перше, проби газу з порожнини циліндра можна відбирати тільки на строго обмежених ділянках робочого циклу;

- по-друге, відбір газу повинен бути короткочасним;

- по-третє, початок відбору газу із циліндра повинен бути жорстко прив'язаний до якого-небудь моменту робочого циклу двигуна.

Електропневматична схема електронної діагностичної системи показників газообміну, що пропонується, наведено на рис. 2. Така схема задовольняє всім перерахованим вище вимогам і містить у собі наступні блоки:

а) електромагнітний клапан, до складу якого у свою чергу надходять такі вузли, як:

– електромагніт, що складається із двох частин: механічного виконавчого пристрою (осердя) й котушки;

- керований блок живлення електромагніта;

- реєстратор тривалості відкриття клапана;

б) індикатор переміщення клапана;

в) аспіратор;

г) блок керування електромагнітним клапаном;

д) датчик верхньої мертвої точки (в.м.т.);

е) датчик кута повороту колінчатого вала (к.п.к.в.).

ж) датчик тиску.

Робота системи з відбору газів полягає в наступному. Блок керування електромагнітним клапаном, що синхронізується сигналами датчика в.м.т., повинен виробляти потужні імпульси електричного струму, які надають рух осердю електромагніта, що діє на клапан, у результаті чого порції газу із циліндра надходять в аспіратор. Початок керуючого імпульсу повинне бути жорстко прив'язане до сигналів датчика к.п.к.в.

При цьому тривалість керуючого імпульсу повинна регулюватися в досить широких межах.

У такому пристрої відбору газів можна виділити два основних вузли:

1) блок керування електромагнітним клапаном;

2) електромагнітний клапан у складі електромагніта з керованим джерелом живлення, що забезпечує подачу імпульсу струму в обмотку електромагніта, а також реєстратора тривалості відкриття клапана, який забезпечує візуальний контроль тривалості відкриття клапана й величини його переміщення.

Такі вузли ставляться до спеціальних засобів радіоелектроніки для дослідження двигунів, якою і є електронна діагностична система показників

газообміну. Вони не випускаються промисловістю й розробка їх сполучена з досить більшими труднощами.

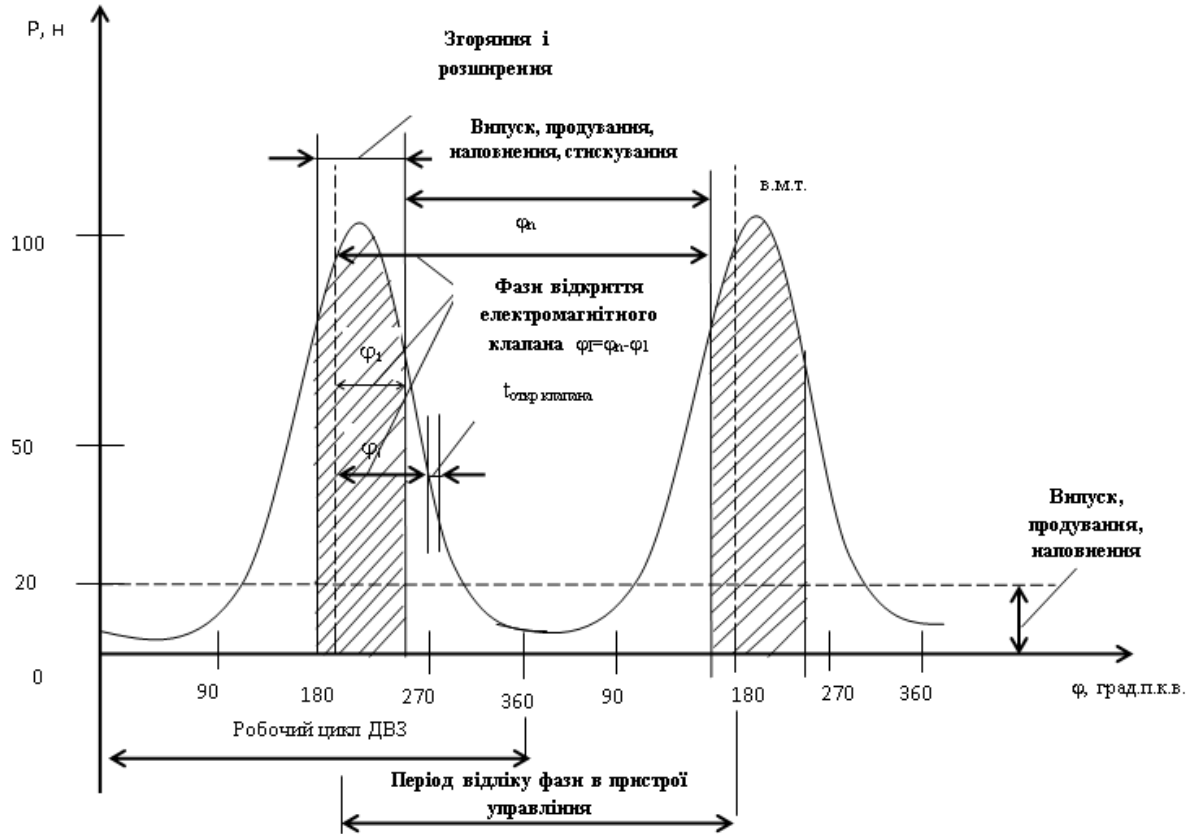


Рис. 1 – Розгорнена індикаторна діаграма двотактного ДВЗ

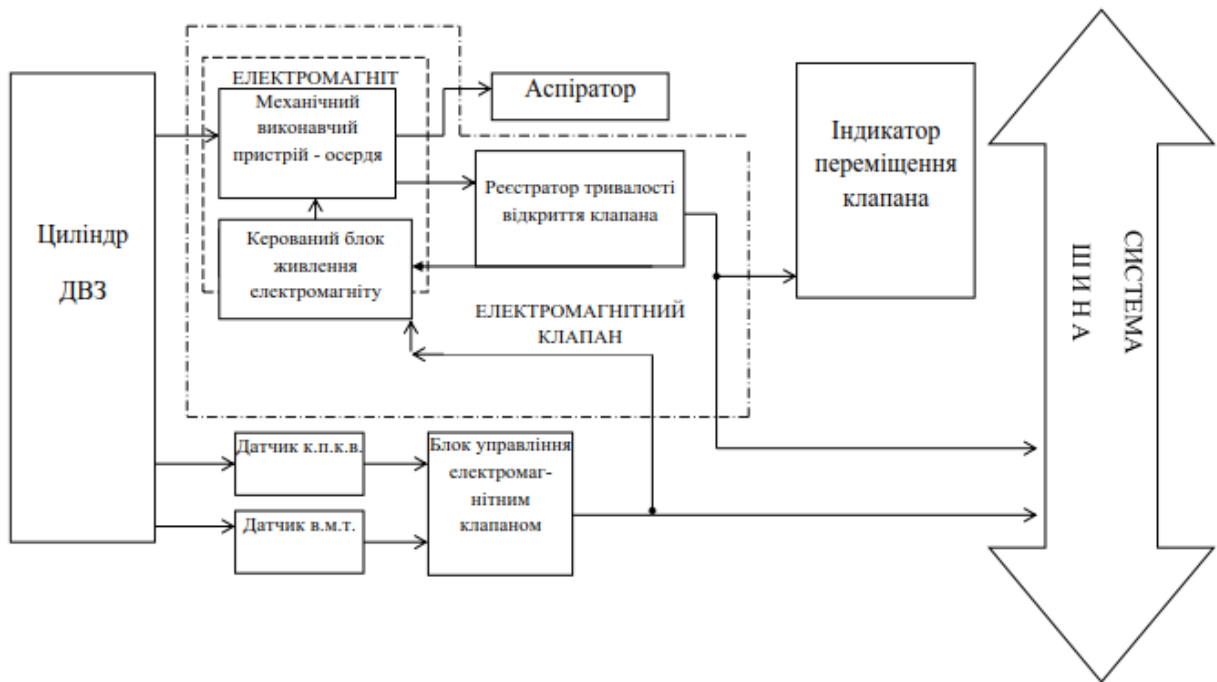


Рис. 2 – Структурна схема електронної діагностичної системи показників газообміну

Дослідження газодинаміки у двигунах проводяться звичайно на стадії доведення двигуна і є одноразовими на кожному етапі доведення. Тому, в цьому випадку, немає необхідності в розробці додаткового дорогого програмного й алгоритмічного забезпечення АСНД. Комп'ютер управляє режимом роботи двигуна, а із пристрою відбору газів у загальну шину надходить тільки інформація про наявність керуючого імпульсу й тривалості включення електромагнітного клапана.

Функціонує електронна діагностична система показників газообміну в такий спосіб. Блок керування електромагнітним клапаном виробляє короткий керуючий імпульс із часовою затримкою, яка задається стосовно якої-небудь маркерної мітки прихожої від датчиків установлених на колінчастому валу ДВЗ. Цей імпульс надходить у блок формувача керуючих імпульсів джерела живлення обмотки електромагніта, де формується імпульс певної тривалості, обумовленої датчиком тривалості.

Таким чином, у кероване джерело живлення обмотки осердя надходить керуючий імпульс заданої тривалості й із заданим часовим зрушенням стосовно маркерної мітки ДВЗ. Живлення на обмотку електромагніта подається в певні часові інтервали. В результаті клапан спрацьовує в задані моменти часу й утримується у відкритому стані заздалегідь певний час.

Блок живлення забезпечує працездатність як самого електромагніта так і плати керування.

Такий пристрій дозволяє відкривати електромагнітний клапан зі звуком стосовно маркерної мітки.

Для досліджень брали одноциліндровий відсік ОД100 ВО «Завод ім. Малишева», оснащений гільзою циліндрів двигуна ЗД100 з отвором під пусковий клапан, в якому знаходився газовідбірний клапан.

Така установка дозволяє звести до мінімуму обсяг між дзеркалом циліндра і тарілкою клапана (в наших дослідженнях він дорівнює 4 см).

У схемі блоку управління передбачені дільник числа сигналів з в.м.т. і плавне регулювання тривалості керуючого сигналу подачі імпульсу на електромагніт. Дільник числа сигналів з в.м.т. регулює число пропускних циклів, завдяки цьому проби газу можна відбирати не в кожному циклі, а через 8,16,32, 64 циклу. Плавне регулювання тривалості керуючого сигналу  $\varphi_y$  забезпечує початок відкриття клапана в будь-якій фазі в межах 0-360 град. п.к.в. Тензометричний перетворювач перетворює переміщення клапана в електричний сигнал, який через підсилювач подається на вхід шлейфового і електронно-променевого осцилографа.

В ході експериментальних досліджень на плівку записували такі позначки і процеси: відмітка в.м.т. ; керуючий сигнал; тривалість відкриття клапана  $\varphi_{кл}$ . Обробка осцилограм дозволила визначити тривалість запізнювання спрацьовування клапана  $\varphi_z$ . Вибором торцевого зазору між якорем і переднім фланцем корпусу електромагніту, зміною зусилля попереднього затягування пружини і регулюванням ходу клапана можна впливати на тривалість його відкриття в інтервалі 8 – 25мс. З урахуванням  $\varphi_z$  встановлювалися моменти початку відбору проб газу на лінії стиснення  $\varphi_c$  і розширення  $\varphi_p$ . Інтервал регулювання керуючого сигналу знаходиться в межах 40-390 мс, тому для відбору проб газу з циліндра двигуна в якості керуючої в.м.т., від якої відраховували  $\varphi_y$ , брали в.м.т., що передуює досліджуваному циклу. Значення  $\varphi_c$ ,  $\varphi_p$  і  $\varphi_{кл}$ , що визначаються за осцилограмами, а також значення обсягів відібраної проби  $V_{пр}$  при ході клапана  $2 \div 2,2$  мм наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Моменти початку відбору газу

Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$		850	785	660	590	465	400
Ділянки стиснення	$\varphi_c$ , град. п.к.в. до в.м.т.	75	65	60	55	50	55
	$\varphi_{кл}$ , град. п.к.в.	53	45	48	40	30	22
	$V_{пр} \text{ см}^3$	420	300	370	260	260	270
Ділянки розширення	$\varphi_c$ , град. п.к.в. після в.м.т.	85	80	70	70	70	70
	$\varphi_{кл}$ , град. п.к.в.	65	65	55	55	40	25
	$V_{пр} \text{ см}^3$	180	165	170	120	100	100

На лінії стиснення момент початку відбору проби газу вибирали по можливості ближче до в.м.т., коли свіжий заряд добре перемішався з залишковими газами. Обсяг відібраної проби при цьому великий, так як відкриття клапана здійснюється при відносно невеликому тиску, а відбір газу – при різко наростаючому. Відібрати відпрацьовані гази в двотактному двигуні на випуску, щоб визначити коефіцієнт надлишку повітря при згорянні  $\alpha$ , важко. В чистому вигляді випуск триває всього 16 град. п. к. в., потім починається продувка. Горіння в циліндрі

закінчується до моменту досягнення максимального значення коефіцієнта активного тепловиділення ( $X_{\max}$  при  $60 \div 80$  град. п.к.в. після в.м.т. на всіх режимах тепловозній характеристики). Незначний вміст окису відібраного на лінії розширення ( $0,013 \div 0,022\%$ ), підтверджує наше припущення про те, що горіння на лінії розширення не відбувається і склад газу в циліндрі двигуна практично не змінюється. Щоб оцінити витік продувочного повітря  $\theta$ , крім значення  $\alpha$ , необхідно знати сумарний коефіцієнт надлишку

повітря  $\alpha_c$ , який визначали в пробах газу, що відбираються з випускного колектора.

Газодинамічні процеси протікають в циліндрі ДВЗ характеризуються цілим рядом показників, основними з яких є [4]:

-  $N_2^*$  – об'ємна концентрація збиткового азоту, тобто це азот повітря, кисень якого вступив в реакцію (%);

- CO – об'ємна концентрація окису вуглецю (%);

-  $CO_2$  – об'ємна концентрація вуглекислого газу(%);

-  $\alpha$  – коефіцієнт збитку повітря – це відношення дійсної кількості повітря до кількості повітря, яке теоретично необхідно для згорання палива масою 1 кг;

-  $\gamma$  – коефіцієнт залишкових газів – це відношення кількості залишкових газів (в кмоль) до кількості свіжого заряду в циліндрі (в кмоль)

Аналізували проби газу методом газоабсорбційної хроматографії [5,6] на газоаналізаторі ХЛ-4. У заводському виконанні цей хроматограф не міг бути використаний для аналізу робочих газів через цілу низку причин:

– велика протяжність газових комунікацій від місця введення проби до розділової колонки і від неї до детектора, що викликає розмивання проби;

– низька чутливість детектора, що працює по теплопровідності;

– нестабільність витрати газу-носія та інше.

Для забезпечення якісного аналізу робочих газів ДВЗ в хроматограф ХЛ-4 були внесені наступні основні зміни:

1) застосована розділова колонка, що складається з двох частин довжиною  $l_1 = 150$  мм і  $l_2 = 450$  мм, між якими встановлено кран дострокового виведення проби.

2) виготовлений і встановлений новий, більш чутливий термохімічний детектор.

3) в якості абсорбенту застосоване активоване вугілля марки СКТ з розміром зерна 0,3-0,12 мм, що при зазначеній довжині колонки (600 мм) в діаметрі 4 мм дозволяє отримати достатній поділ азоту і окису вуглецю.

4) в якості газу-носія застосовано повітря, що пояснюється його доступністю, стабільністю складу і забезпеченням згорання горючих компонентів ( $H_2$ , CO і  $CH_4$ ) в детекторі.

При використанні в якості газу-носія повітря детектор хроматографа фіксує наявність в аналізованій пробі лише надлишкового азоту ( $N_2^*$ ), тобто азоту повітря, кисень якого вступив в реакцію. Решта азоту і кисню, співвідношення між якими дорівнює 3,78 (як в повітрі), тобто повітря приймають складається з 0,21 об'ємних частин кисню ( $O_2$ ) і 0,79 об'ємних частин азоту ( $N_2$ ) хроматографом не фіксується. Ця особливість хроматографа значно підвищує точність визначення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ .

Припускаючи, що згорання в циліндрі двигуна повне, наведемо основні залежності для визначення  $CO_2$  в пробах газу.

Процентний вміст  $CO_2$ , в пробах, взятих відповідно на лініях розширення і стиснення, з випускного колектора можна знайти з виразу

$$CO_2 = \frac{0,209}{0,791} N_2 \left[ 1 - \frac{\beta}{(0,791 + \beta)} \right], \quad (1)$$

де  $\beta = 0,358$ -характеристика палива.

З огляду на незвичайну інтерпретацію складу робочих газів, одержуваних на хроматографі (визначається лише надлишковий азот і не визначається кисень), загальноприйняті формули, виведені стосовно газоаналізатора типу ВТІ-2, не можуть бути використані. На підставі аналізу особливостей хроматографічного методу виведені нові формули.

При повному горінні  $\alpha$  визначається за формулою

$$\alpha = \frac{0,791}{N_2^x} (100 - CO_2) + 0,209, \quad (2)$$

де  $N_2^x$  – об'ємна концентрація надлишкового азоту, %;  $CO_2$  – об'ємна концентрація вуглекислого газу, %.

При неповному згоранні формула для визначення  $\alpha$  має вигляд

$$\alpha = \frac{0,791 [100 - (CO_2 + CO + H_2 + \sum C_m H_n)] + 0,209 N_2^x}{N_2^x + 1,89 [CO + H_2 + \sum (2m + \frac{n}{2}) C_m H_n + 2C]}, \quad (3)$$

де  $CO, H_2, C_m H_n$  – об'ємні концентрації (у відсотках) відповідно окису вуглецю, водню і важких вуглеводнів;  $C$  – умовна об'ємна концентрація незгорілого вуглецю, м / м<sup>3</sup>,

При наявності в продуктах горіння недопалу у вигляді CO і  $H_2$ , формула (3) спрощується, набуваючи вигляду

$$\alpha = \frac{0,791 (100 - CO_2 - CO - H_2) + 0,209 N_2^x}{N_2^x + 1,89 (CO + H_2)}. \quad (4)$$

Коефіцієнт витoku продувочного повітря визначався за формулою

$$\vartheta = \frac{\alpha_T - \alpha}{\alpha_T}, \quad (5)$$

де  $\alpha_T$  – сумарний коефіцієнт надлишку повітря, визначений на підставі результатів аналізу проби з випускного ресивера.

Коефіцієнт залишкових газів  $\gamma$  визначався по об'ємним концентраціям  $CO_2$ , на такті випуску і такті стиснення:

$$\gamma = \frac{CO_2 - CO_{2b}}{CO_2 - CO_2} \cdot \frac{1 - H_2 O_{в03}}{1 - \frac{0,5H + H_2 O_{в03} \alpha M_0}{\alpha M_0 + \frac{H + O}{32}}}, \quad (6)$$

де  $CO_2, CO_2$ , и  $CO_{2b}$  – об'ємна концентрація вуглекислого газу відповідно на тактах випуску, стиснення і в навколишньому повітрі;  $H_2 O_{в03}$  – об'ємний вміст водяної пари в повітрі:

-  $M_0$  – теоретично необхідна кількість повітря, кмоль / кг палива;

-  $H$  і  $O$  – вагові частки водню і кисню в паливі.

Показники газообміну двигуна ОД100 визначали на режимах тепловозній характеристики, тобто коли потужність тепловозного двигуна, що витрачається на привід головного електрогенератора тепловоза, залежить від частоти обертання.

З метою забезпечити достовірність результатів, проби газу на кожному з режимів роботи відбирали в кілька аспіраторів і проводили повторні випробування.

Результати експериментальних досліджень показників газообміну тепловозного дизеля ОД100 наведені на рис. 3 ÷ 6.

Точками на графіках показані експериментальні значення. На режимах 400÷550 об / хв, в очевидь через малі тиски в циліндрі, не вдалося відібрати представницькі проби газу для визначення  $\alpha$  і  $\gamma$ . Тому на цих ділянках вони визначалися розрахунковим шляхом і на графіках показані пунктиром.

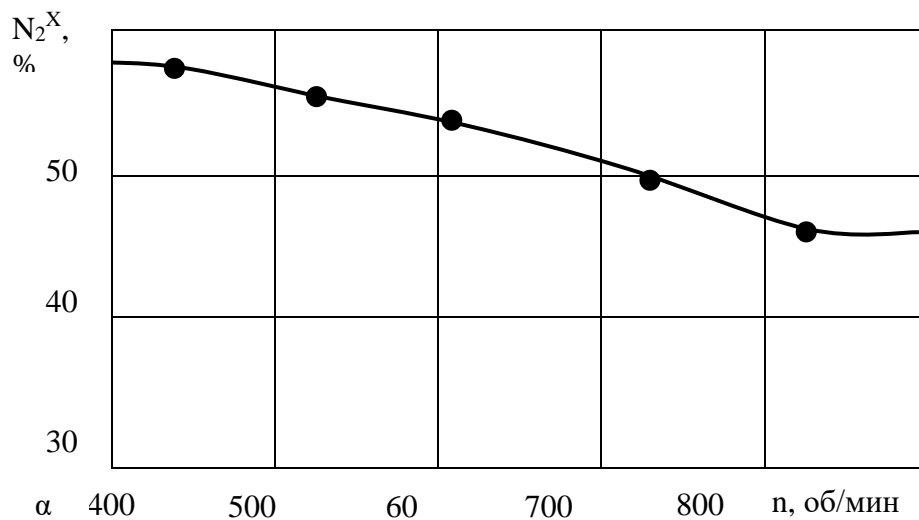


Рис. 3 – Об'ємна концентрація надлишкового азоту двигуна ОД100 при роботі по тепловозній характеристиці

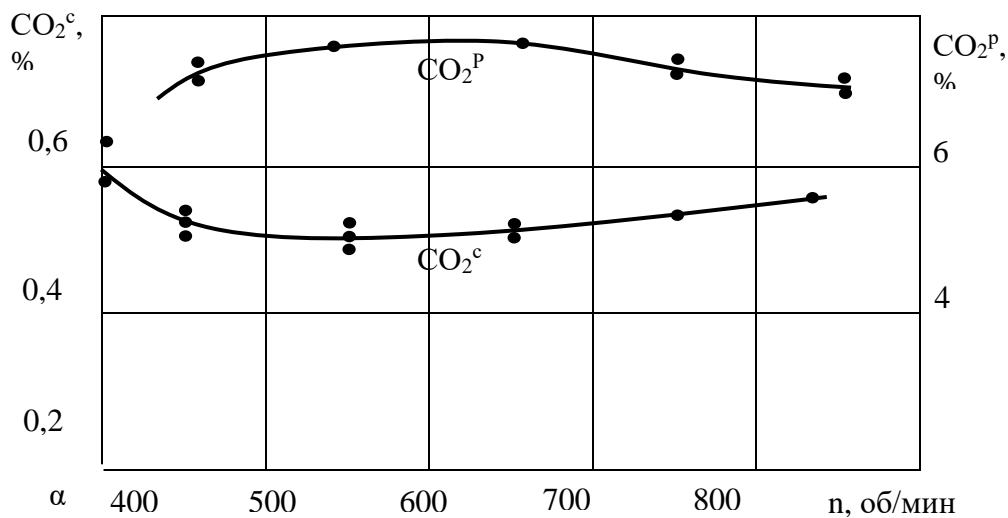


Рис. 4 – Об'ємна концентрація вуглекислого газу двигуна ОД100 при роботі по тепловозній характеристиці

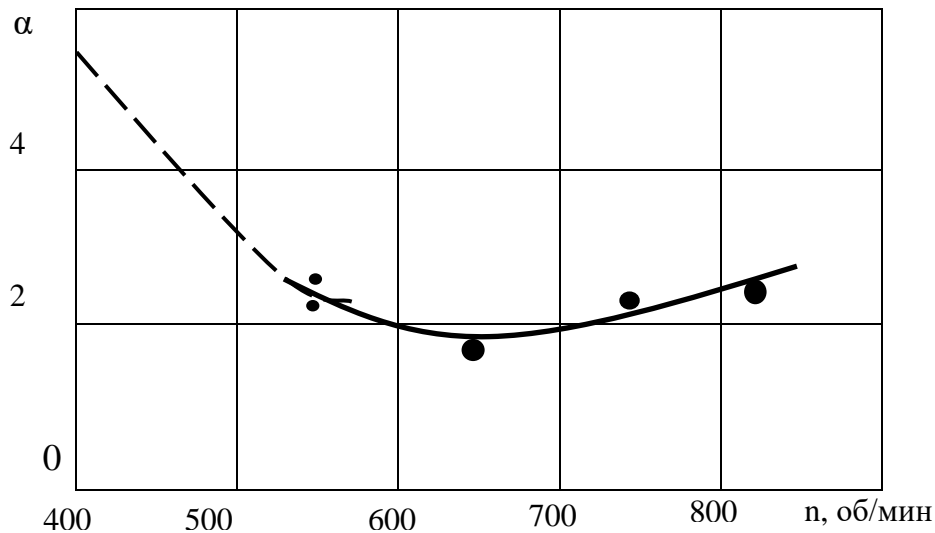


Рис. 5 – Залежність коефіцієнта надлишку повітря при роботі двигуна ОД 100 по тепловозній характеристиці

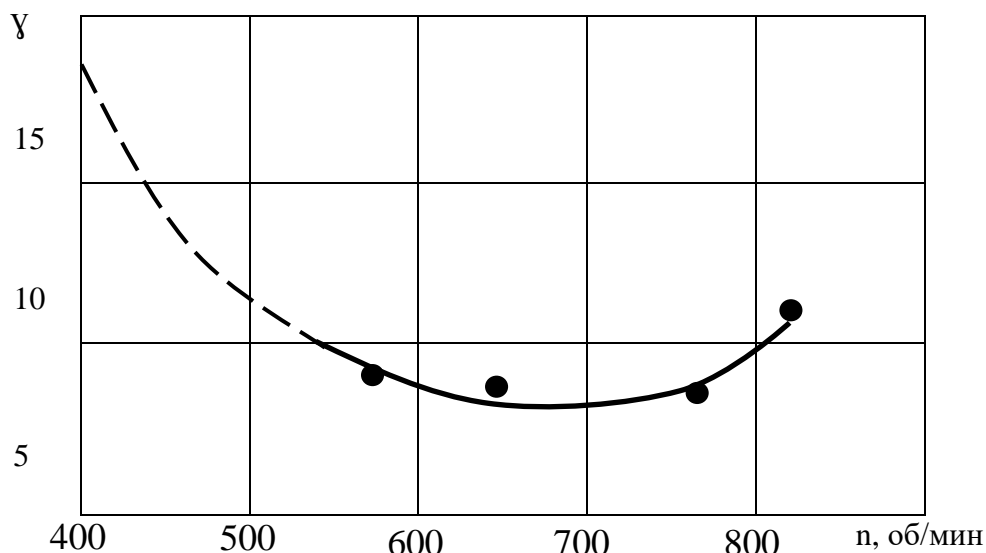


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта залишкових газів при роботі двигуна ОД 100 по тепловозній характеристиці

З наведених результатів і аналізу робочих газів слідує:

1) у міру зниження  $n$  на режимах тепловозній характеристики збільшується вміст основних компонентів в пробі ( $N_2^*$  і  $CO_2$ ), що визначає зменшення  $\alpha$ ;

2) на режимах тепловозній характеристики від 530 до 1000 об / хв  $N_2^*$  і  $CO_2$  в пробі з випускного патрубка кришки циліндра більше, ніж  $N_2^*$  і  $CO_2$  в пробі газів з випускного ресивера, що визначає наявність продувки;

3) недопал у вигляді  $H_2$  і  $CO$  незначний по всій характеристиці може бути досить точно визначений тільки за допомогою високочутливого газоаналізатора.

#### Висновки.

1) Розроблена електронна система діагностики показників газообміну в дизелі і, в тому разі конструкція газовідборного клапана застосована для відбору проб робочих газів, виявилися надійними і забезпечили представництво проби газів на всіх ділянках робочого циклу.

2) Отримані експериментальні дані показників газообміну дозволяють намітити шляхи вдосконалення процесів в газоповітряних трактах, що в свою чергу позначиться на техніко-економічних показниках роботи двигуна.



## Список літератури

1. Технические средства диагностирования: Справочник. / под ред. В.В. Клюева – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
2. Смолин Ю.А. Об общности некоторых направлений при создании АСНИ и систем управления качеством в двигателестроении. / 3-я междунар. научно-техн. конф. Контроль и управление в технических системах. Тез. докл., Часть 1. – Винница: 1995. – С. 142–143.
3. Смолин Ю.А. Контрольно-информационная система компьютерной диагностики ДВС. / Ю.А. Смолин // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: 2003, №7. – С.34-38.
4. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания / В.Г. Дьяченко – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 500 с.
5. Грушка Э. Количественный анализ хроматографическими методами /Э. Грушка, Пер с англ. – М.: Мир, 1990. – 319 с.
6. Экспериментальные методы адсорбции и молекулярной хроматографии. / под ред. Ю.С. Никитина, Р.С. Петровой. 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 315с.

## References (transliterated)

1. Tehnicheskie sredstva diagnostirovaniya: Spravochnik. / pod red. V.V. Klyueva – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 672 p.
2. Smolin Yu.A. Ob obshnosti nekotoryh napravlenij pri sozdanii ASNI i sistem upravleniya kachestvom v dvigatelestroenii. / 3-ya mezhdunar. nauchno-tehn. konf. Kontrol i upravlenie v tehniceskikh sistemah. Tez. dokl., Chast 1. – Vinnica: 1995. P. 142–143.
3. Smolin Yu.A. Kontrolno-informacionnaya sistema kompyuternoj diagnostiki DVS. / Yu.A. Smolin // Visnik shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu im. V. Dallya. – Lugansk: 2003, No7. – P. 34–38.
4. Dyachenko V.G. Teoriya dvigatelej vnutrennego sgoraniya / V.G Dyachenko – Kharkov: HNADU, 2009. – 500 p.
5. Grushka E. Kolichestvennyj analiz hromatograficheskimi metodami /E. Grushka, Per s ang. – Moscow : Mir, 1990. – 319 p.
6. Eksperimentalnye metody adsorbicii i molekulyarnoj hromatografii. / pod red. Yu.S. Nikitina, R.S. Petrovoj. 2-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU, 1990. – 315 p.

*Надійшла (received) 21.10.2019*

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Смолін Юрій Олександрович (Смолин Юрій Александрович, Smolin Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

УДК 620.179.14

**В.А. СТОРОЖЕНКО, Р. П. ОРЕЛ, С. Н. МЕШКОВ****ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Описана методика проведения тепловизионного обследования жилых и административных зданий. Обнаружены эксплуатационные и конструктивные тепловые аномалии исследованных зданий, по которым проведены расчеты тепловых потерь. Абсолютные (ожидаемые) значения тепловых потерь сильно зависят от точности инструментального определения входных параметров. Исследованы группы факторов, влияющих на конечный результат. Показано, что наибольшую сложность представляет инструментальное определение коэффициента внешней теплоотдачи наружной поверхности стен объектов. При малых уровнях тепловой мощности излучаемых наружными стенами при отрицательных температурах воздуха применение измерителей тепловых потоков весьма затруднительно, что отражается на точности расчетов. Показано, что основным противоречием при проведении тепловизионного теплового аудита является то, что тепловые потери определяются на момент съемки, а затем экстраполируются на годовой период с учетом нормируемой температуры внутри помещений, средних климатических условий в данной местности и длительности отопительного периода. Выдвигается и обосновывается тезис, что тепловизионный метод наиболее эффективен и дает достоверные результаты при расчете относительных тепловых потерь, регистрируемых на момент съемки. В целом, тепловизионный энергоаудит может давать ориентировочные оценки тепловых потерь, что обусловлено большим числом параметров, которые надо учитывать при натуральных исследованиях. Визуализация и документирование температурных аномалий при соблюдении всех методических рекомендаций и расчет тепловых потерь позволяют формировать управленческие решения для разработки мер по теплосбережению. Указаны направления дальнейшего развития и совершенствования тепловизионного диагностирования и расчета температурных потерь.

**Ключевые слова:** тепловизионное диагностирование, ограждающие конструкции зданий, тепловые потери.

**В.О. СТОРОЖЕНКО, Р. П. ОРЕЛ, С. М. МЕШКОВ****ТЕПЛОВІЗІЙНА ДІАГНОСТИКА ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

Описана методика проведення тепловізійного обстеження житлових і адміністративних будівель. Виявлено експлуатаційні і конструктивні теплові аномалії досліджених будівель, за якими проведені розрахунки теплових втрат. Абсолютні (очікувані) значення теплових втрат сильно залежать від точності інструментального визначення вхідних параметрів. Досліджено групи факторів, що впливають на кінцевий результат. Показано, що найбільшу складність представляє інструментальне визначення коефіцієнта зовнішньої теплоїдачі зовнішньої поверхні стін об'єктів. При малих рівнях теплової потужності, що випромінюється зовнішніми стінами при негативних температурах повітря, застосування вимірювачів теплових потоків вельми скрутно, що відображається на точності розрахунків. Показано, що основним протиріччям при проведенні тепловізійного теплового аудиту є те, що теплові втрати визначаються на момент зйомки, а потім екстраполюються на річний період з урахуванням нормованої температури всередині приміщень, середніх кліматичних умов в даній місцевості і тривалості опалювального періоду. Було висунуто і обґрунтовується теза, що тепловізійний метод найбільш ефективний і дає достовірні результати при розрахунку відносних теплових втрат, що реєструються на момент зйомки. В цілому, тепловізійний энергоаудит може давати орієнтовні оцінки теплових втрат, що обумовлено великим числом параметрів, які треба враховувати при натуральних дослідженнях. Визуалізація і документування температурних аномалій при дотриманні всіх методичних рекомендацій і розрахунок теплових втрат дозволяють формувати управлінські рішення для розробки заходів з теплосбереження. Вказано напрямки подальшого розвитку та вдосконалення тепловізійного діагностування та розрахунку температурних втрат.

**Ключові слова:** тепловизионное диагностирование, оградительные конструкции зданий, тепловые втрати.

**V.A. STOROZHENKO, R. P. OREL, S. N. MESHKOV****THERMOGRAPHIC EXAMINATION OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS THERMAL PROTECTION**

The technique of thermal imaging survey of residential and office buildings is described. The operational and constructive thermal anomalies of the investigated buildings were revealed, for which the heat losses were calculated. The absolute (expected) values of heat losses strongly depend on the accuracy of the instrumental determination of input parameters. The groups of factors influencing the final result are investigated. It is shown that the greatest difficulty is the instrumental determination of the external heat transfer coefficient of the outer surface of the walls of objects. At low levels of thermal power emitted by external walls at negative air temperatures, the use of heat flow meters is very difficult, which affects the accuracy of the calculations. It is shown that the main contradiction in conducting of thermal imaging heat audit is that heat losses are determined at the time of the survey, and then extrapolated for a one-year period, taking into account the normalized indoor temperature, average climatic conditions in the room and the duration of the heating period. The thesis is advanced and substantiated that the thermal imaging method is most effective and gives reliable results when calculating the relative heat losses recorded at the time of the shooting. In general, a thermal imaging energy audit can provide approximate estimates of heat losses, due to a large number of parameters that must be considered in field studies. Visualization and documentation of temperature anomalies in compliance with all the guidelines and the calculation of heat loss allows you to create management solutions for the development of measures for heat saving. The directions of further development and improvement of thermal imaging diagnostics and calculation of temperature losses are indicated.

**Keywords:** thermal imaging diagnostics, building envelopes, heat losses.

**Введение.** В последнее десятилетие существенно вырос интерес к применению тепловидения в строительстве. В Украине это обусловлено следующими факторами: введением новых ДСТУ, строительных норм, энергетических паспортов. Все это стимулировало появление рынка услуг по энергоаудиту строительных сооружений и спросу на тепловизоры. Цены на тепловизоры снизились почти на порядок, измерительные модели стали доступными

организациям и даже физическим лицам. Пока, к сожалению, украинских официальных документов, используемых в тепловизионном аудите недостаточно [1]. Также мало и отечественных работ, посвященных этой теме. Однако, в связи с близостью общих строительных норм и климатических условий, вполне допустимо применение некоторых российских официальных документов [2, 3, 4], в основе которых лежат международные стандарты [5]. Значительное

© В. А. Стороженко, Р. П. Орел, С. Н. Мешков, 2019

количество стандартов и руководств были разработаны в Швеции, Канаде и США.

Однако, несмотря на очевидные достижения строительного тепловидения, теория тепловизионного контроля и методология его применения в значительной мере опираются на исследования, которые проводились еще в 80-х и 90-х годах [6, 7]. Можно сказать, что в современной тепловизионной практике в основном превалирует качественная картина и существует определенный разрыв между теоретическими аспектами теплопередачи и практическими обследованиями зданий и сооружений. Поэтому в настоящее время особое внимание уделяется количественной интерпретации результатов тепловизионного обследования.

Оценки тепловых потерь и сопротивления теплопередаче зданий могут быть проектными и экспериментальными. Известно, что фактическое состояние теплозащиты сооружений может весьма значительно отличаться от проектных значений в силу ошибок проектирования, недобросовестного строительства, деградации материалов с течением времени за счет увлажнения, старения, разрушения и тому подобных процессов. Поэтому важное место в энергетических обследованиях приобретает экспериментальная (инструментальная) оценка параметров теплозащиты ограждающих конструкций.

**Методика расчета тепловых потерь по результатам тепловизионного аудита.** Согласно схеме (рис. 1) при известных температурах воздуха внутри и снаружи контроля (соответственно  $T_{air}^{in}$  и  $T_{air}^{out}$ ), прогнозируемые тепловые потери  $W$  (МДж или Гкал) определяются по формуле [8]:

$$W = \sum_{k=1}^N Q_{cur,k} \tau \Delta S_k \cdot \frac{T_{air}^{in} - T_{air}^{out}}{T_{air,norm}^{in} - T_{air,norm}^{out}}, \quad (1)$$

где  $Q_{cur,k}$  – текущие тепловые потери в  $k$ -зоне;

$\tau$  – продолжительность отопительного сезона;

$\Delta S_k$  –  $k$ - область измерений;

$T_{air,norm}^{in}$  – нормативная температура внутри помещений (+21°C для жилых помещений);

$T_{air,norm}^{out}$  – средняя нормативная температура наружного воздуха в течение отопительного периода.

Выражение (1) распространяет данные текущих измерений на весь отопительный период. Предполагается, что система отопления может регулироваться для обеспечения комфортной температуры в помещениях при изменяющейся наружной температуре.

С помощью тепловизора, как правило, обследуют ограждающие поверхности, а теплотери через крышу и фундамент оценивают согласно разработанным в строительной теплофизике рекомендациям [7, 8].

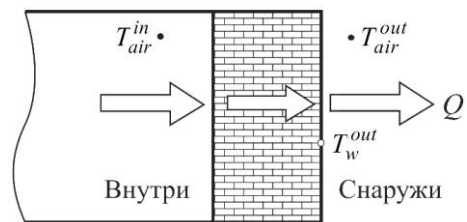


Рис. 1 – Схема и параметры для определения тепловых потерь

Большая часть тепловых потерь приходится на инфильтрацию холодного воздуха, основная часть которого поступает через притворы и неплотности окон и балконных дверей.

Таблица 1 – Теплотери через отдельные элементы зданий

Элемент здания	Доля теплотери, %
Стены	32,0
Окна	29,0
Кровли	24,0
Воздухообмен	9,0
Фундамент	6,0

Измерения сравнительно легко производятся на боковых ограждающих поверхностях (стенах). Тепловизионное обследование крыш и фундамента не всегда возможно и зачастую сводится к точечным оценкам с помощью ИК пирометров.

Для оценки теплотери необходимо измерять плотность мощности теплового потока  $Q_{cur,k}$  как функцию координат в каждой  $k$ -зоне обследования. ИК-термометры и тепловизоры не способны измерять тепловой поток, проходящий через ограждающие конструкции, величину  $Q_{cur,k}$  определяют в отдельных точках на внутренней поверхности ограждающей конструкции, используя измерители мощности теплового потока. Измерения проводят как на стенах, так и на окнах. Усреднение экспериментальных данных является сложной задачей из-за трудностей доступа к желаемым точкам измерений, а также из-за влияния систем отопления и вентиляции.

Ключевая роль тепловидения в рассматриваемой измерительной процедуре состоит в определении температурного распределения  $T_w^{out}$  по всей поверхности ограждающей конструкции. При этом теплопередача через стену считается стационарной. Последнее условие является обязательным, если используются формулы, рекомендуемые зарубежными и российскими стандартами. Если не учитывать рекомендованные методы учета суточных колебаний температуры [9, 10], то тогда средняя плотность теплового потока через ограждающую конструкцию согласно [8] равна:

$$Q_{cur,av} = Q_{cur,ref} \cdot \frac{T_w^{out,av} - T_{air}^{out}}{T_w^{out,ref} - T_{air}^{out}}, \quad (2)$$

где  $Q_{cur.ref}$  – текущее значение плотности теплового потока в выбранной эталонной точке на внутренней поверхности стены;

$T_w^{out.ref} - T_{air}^{out}$  – разность температур наружной поверхности стены в эталонной точке и наружного воздуха;

$T_w^{out.av}$  – средняя температура наружной стены, рассчитанная путем усреднения результатов тепловизионной съемки.

Принимается, что из-за линейного характера теплопередачи плотность мощности теплового потока в различных точках пропорциональна разности температур наружной стены и наружного воздуха. При подобных расчетах не рассматриваются тепловые потери вследствие работы естественной или принудительной вентиляции.

Общие тепловые потери можно оценить по формуле

$$W = Q_{cur.ref} \tau S \cdot \frac{T_w^{out.av} - T_{air}^{out}}{T_w^{out.ref} - T_{air}^{out}} \times \frac{T_{air}^{in} - T_{air}^{out}}{T_{air,norm}^{in} - T_{air,norm}^{out}}, \quad (3)$$

где  $S$  – область, в которой выполнено усреднение результатов тепловизионных измерений. Величина  $Q_{cur.ref}$  зависит от сопротивления теплопередаче стены, а другие параметры предназначены для корректировки тепловых потерь по всей поверхности ограждающих конструкций согласно нормативным требованиям.

**Результаты тепловизионного оценивания тепловых потерь.** Специалистами НТЦ "Термоконтроль" Харьковского национального университета радиоэлектроники был проведен ряд тепловизионных обследований жилых и административных зданий. Например, студенческого общежития университета. Использовались измерительные средства: тепловизор ИРТИС-200, инфракрасный пирометр INFRAMETRICS H-107, датчик теплового потока ИТП-6. Целью тепловизионной диагностики были:

1. оценка качества здания;
2. оценка общих тепловых потерь здания и рекомендации по энергосбережению.

Климатические условия на момент съемки: температура наружного воздуха составляла  $-4,0$  °С, температура внутри помещений на разных этажах составляла от  $+19$  °С до  $+22$  °С. В ходе сплошного мониторинга с помощью тепловизора осмотрены три стороны здания и фасад со стороны внутреннего двора. Произведен замер температуры в коридорах на четырех этажах. В реперных точках на поверхности стен и окон внутри и снаружи здания измерены тепловые потоки с помощью прибора ИТП-6. Размеры здания и объем ( $14400$  м<sup>3</sup>) определены по технической документации (рис. 2). Площадь боковых ограждающих конструкций оценена в  $2460$  кв.м.

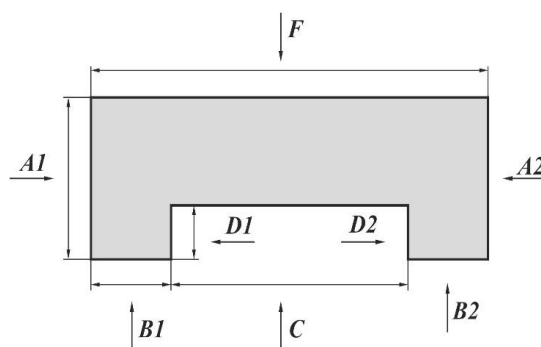


Рис. 2 – Схема тепловизионной съемки здания

Измеренные температуры внутри здания составили:

- +19,3 °С на 1-го этаже вдали от воздушных нагревателей;
- +20,0 °С в коридоре 2-го этажа;
- +20,4 °С в коридоре 3-го этажа;
- +21,1 °С в коридоре 4-го этажа.

Исходя величины из размеров поля зрения тепловизора и рекомендаций [6, 8] при расстоянии  $20$  м до объекта размер  $k$ -зоны на стене здания составлял около  $7$  м. Время адаптации тепловизора к температуре наружного воздуха составило не менее  $30$  минут. В результате панорамного осмотра было получено более  $30$  термограмм.

Термографирование позволило оценить тепловой режим отдельных помещений здания. Разброс температур наружных стен фасадов составлял  $-0,52$  °С ...  $-2,56$  °С. На разных этажах здания были обнаружены окна с высокими потерями тепла (за счет открытой внутренней рамы). Обработка термограмм показала, что средняя температура на всей боковой поверхности здания составляет  $-1,44$  °С.

Потери тепловой мощности из здания через боковую поверхность  $S$  на момент съемки согласно формуле (1) составляли около  $53$  кВт.

Согласно таблице 1 и данным [7] полные тепловые потери здания превышают тепловые потери через боковые ограждающие конструкции в  $2,3$  раза. Тогда полные потери тепловой мощности из здания на момент обследования составили около  $121$  кВт.

При оценке тепловых потерь из здания за отопительный период следует исходить из нормативной температуры внутри помещений ( $+18$  °С) и средней зимней температуры. Для города Харькова средняя температура воздуха за отопительный период составляет  $-4,3$  °С. На момент обследования температурный напор составлял порядка  $25$  °С ...  $28$  °С, то есть был близок к расчетному, поэтому потери тепловой мощности порядка  $121$  кВт справедливы также и при нормативных оценках.

Нормативные потери тепловой энергии через все ограждающие конструкции составили  $361$  Гкал/год. Сравнение с фактическими затратами по счетчику теплоснабжения показали, что расчетная оценка выше на  $32\%$ . Близкие к этому результату расхождения были получены и другими авторами, которые использовали указанную методику в своих исследованиях [11, 12].



Под оптимальным тепловым режимом здания понимается такой, который обеспечивает во всех помещениях нормативную температуру 18 °С при средней зимней температуре климатической зоны. Из анализа термограмм здания следует, что на момент обследования оптимизация теплового режима должна привести к уменьшению средней температуры здания на 1,0 °С. Эта величина сохраняется и при переходе к нормативному тепловому режиму, поскольку фактический и расчетный температурный напор

приблизительно одинаковы. Тогда годовая экономия составит согласно формуле (1) около 157 Гкал/год.

Анализ термограмм выявил наличие в некоторых помещениях общежития запрещенных нагревательных приборов (рис. 3). Источниками потерь тепловой энергии являлись ниши под окнами, где установлены радиаторы центрального отопления (рис. 4), а также некачественно установленные оконные пакеты.

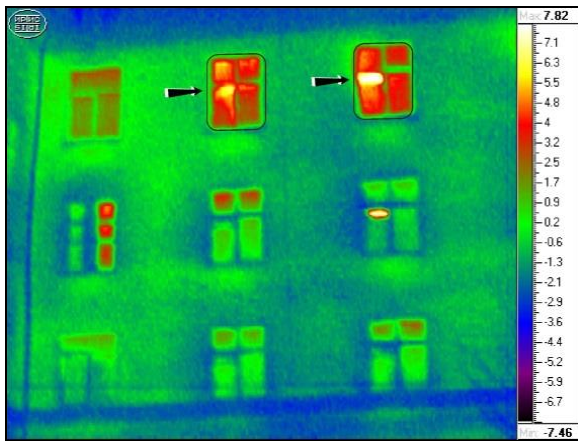


Рис. 3 – Помещения с дополнительными нагревательными приборами

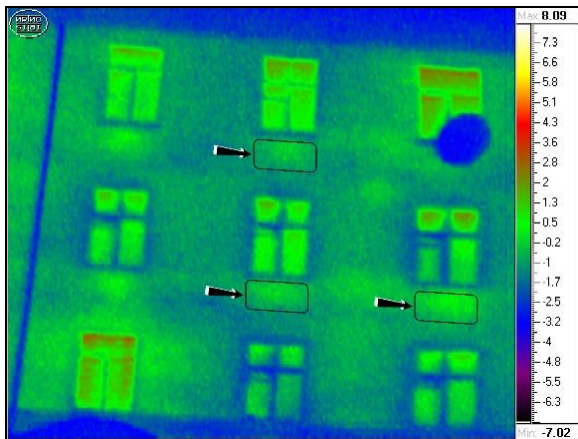


Рис. 4 – Тепловые потери из мест установки радиаторов центрального отопления

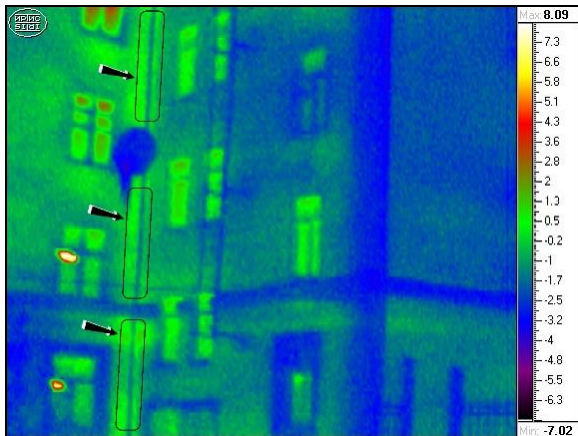


Рис. 5 – Дефект конструкции здания. Стык между фасадами С и D

Ранее при ремонте здания часть деревянных оконных рам были заменены на однокамерные стеклопакеты. Термографирование не выявило существенного отличия по величине тепловых потерь между старыми деревянными окнами с двойными рамами и новыми пластиковыми окнами с однокамерными стеклопакетами.

При обследовании были обнаружены дефекты конструкции здания – стык между фасадами С и D (рис. 5). Площадь дефекта составила около 12 кв.м. Дефектный стык приводит к потерям тепла, возможному сдвигу точки росы внутрь здания и промерзанию здания с последующим его разрушением. Оценка потери тепловой мощности составила около 0,14 кВт или 480 Мкал/год.

В количественном выражении тепловые потери от мест установки радиаторов отопления по указанной методике составляют около 2,29 Гкал/год. Итоговые расчеты по зданию общежития представлены в табл. 2.

По результатам обследования в целях экономии энергоресурсов были разработаны следующие рекомендации:

1. Установка теплозащитных отражающих экранов в нишах установки радиаторов;
2. Устранение щелей у некачественно установленных оконных рам;
3. Удаление самодельных нагревательных приборов из комнат общежития.

В случае установки тепловых экранов указанных тепловых потерь можно избежать (около 2,29 Гкал/год). Последняя мера имеет двойной эффект, так как повышает пожаробезопасность здания.

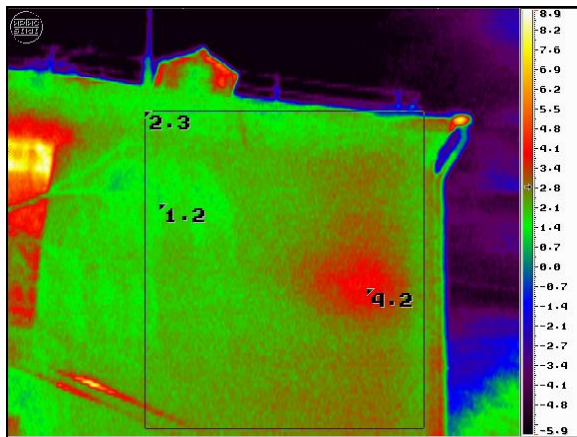


Таблица 2 – Результаты расчета тепловых потерь общежития №2 ХНУРЭ

Источник	Оценка потерь тепловой энергии, Гкал/год	Часть от общих тепловых потерь, %
Здание общежития	361	100
Места установки радиаторов отопления	2,29	0,6
Стык фасадов С и D2	0,48	0,1

Интересный расчет тепловых потерь был проведен для здания спального корпуса школы-интерната посёлка Кочеток, Харьковской области (рис. 6). Внутри корпуса находились душевые комнаты, внешняя стена которых была выложена с нарушением строительных норм. Потери тепла на момент съемки составили 112 Вт. Отчет о тепловизионном обследовании с соответствующими расчетами был представлен администрации учреждения

Большой интерес представляет эффективность современных систем отопления, которые устанавливаются в административных зданиях новой постройки. На рис. 7 показан фрагмент фасада новостройки административного здания. Источником тепловых потерь является вентиляционный выход, установленный на верхних этажах здания. Тепловые потери оцениваются на уровне около 0,19 Гкал/год.



Рис. 6 – Тепловые потери здания спального корпуса школы-интерната



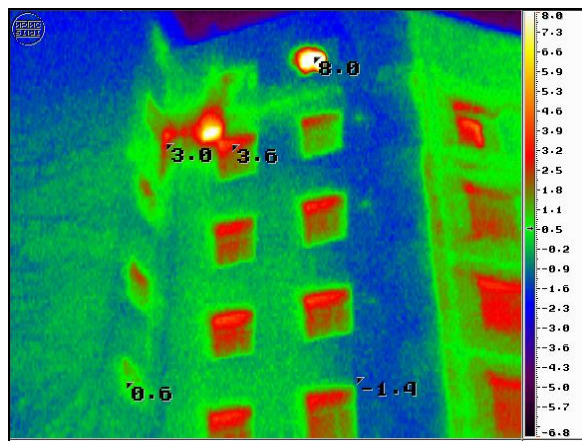


Рис. 7 – Тепловые потери через отверстие воздушной вентиляции.

### Особенности тепловизионного энергоаудита, снижающие точность оценки тепловых потерь.

При тепловизионном энергоаудите можно выделить две особенности, снижающие его точность:

1. Недостаточное метрологическое обоснование тепловизионных измерений (использование экономичных тепловизоров с небольшим форматом термоизображений (160×120 и менее) и существенной погрешностью температурных измерений (обычно  $\pm 2$  % или  $\pm 2$  °C, что мало приемлемо в энергоаудите);
2. Невыполнение методических рекомендаций по обеспечению точных температурных измерений при априорном отсутствии значений ряда параметров.

Первый момент можно разрешить достаточно просто, если применить для съемки тепловизор более высокого класса. Примерные характеристики такого прибора приведены в [5]. Выполнение методических рекомендаций требует значительно больших усилий. Есть сведения, что при невыполнении методических рекомендаций по проведению тепловизионных съемок экспериментальные оценки погрешности измерения температуры фасадов зданий могут достигать 1,8 °C. Снизить методические погрешности можно введением ряда корректирующих параметров. К ним относятся уточненные значения коэффициентов излучения стен и окон, которые могут отличаться от табличных [6]. Определение этих параметров должно проводиться во время тепловизионной съемки по специальным методикам [5], что значительно влияет на сложность и трудоемкость проводимых работ. Важное значение имеет время адаптации тепловизора к температуре наружного воздуха (оно должно составлять не менее 60 мин.). В случае полного соблюдения методических правил съемки и наличия относительно слабых отклонений значений отраженной температуры фона и коэффициента излучения от истинных можно снизить погрешность до 0,4 °C.

Основным противоречием при проведении тепловизионного теплового аудита является то, что тепловые потери определяются на момент съемки, а затем экстраполируются на годовой период с учетом нормируемой температуры внутри помещений, средних климатических условий в данной местности

и длительности отопительного периода. В целом, тепловизионный энергоаудит может давать ориентировочные оценки тепловых потерь, что обусловлено большим числом параметров, которые надо учитывать при натурных исследованиях. При соблюдении всех методических рекомендаций оценивание тепловых потерь является ориентиром для разработки мер по теплосбережению.

**Заключение.** Опыт проведенных тепловизионных обследований показывает, что, очевидно, в ближайшее время наиболее достоверными результатами тепловизионного диагностирования можно считать качественное определение мест аномальных тепловых потерь и относительные расчеты таких дефектов, которые проведены на момент съемки.

Абсолютные (ожидаемые) значения тепловых потерь сильно зависят от точности инструментального определения входных параметров. Наибольшую сложность представляет инструментальное определение коэффициента внешней теплоотдачи наружной поверхности стен объекта. При малых уровнях тепловой мощности излучаемых наружными стенами при отрицательных температурах воздуха применение измерителей тепловых потоков весьма затруднительно, что отражается на точности показаний. Вторым фактором, вносящим большую погрешность в конечный результат являются усредненные среднегодовые показатели, которые не учитывают микроклиматические условия местоположения здания.

Направлениями дальнейшего развития тепловизионного диагностирования является совершенствование методологии проведения обследований, включающее инструментальное определение ряда характеристик в момент съемки (коэффициента теплоотдачи стен, коэффициента черноты материала стен и др.).



## Список литературы

1. ДСТУ Б EN 13187:2011 Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрарчервоний метод. Київ, Мінрегіон України, 2012. 33с.
2. ГОСТ Р 54852-2011 Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. М.: Стандартинформ, 2012. 16с.
3. СНиП 11-3-79 Строительная теплотехника. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 32с.
4. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий, М.: Госстрой РФ, 2004. 27 с.
5. DIN EN 13187-1999 Thermal Performance of Buildings – Qualitative detection of thermal properties in building envelopes – Infrared method. German Institute for Standardisation, 1999, 13p.
6. Дроздов В. И., Сухарев В. И. Термография в строительстве. М.: Стройиздат, 1987. 238 с.
7. Petersson B., Axen B. Thermography: Testing of Thermal Insulation and Airtightness of Buildings. Swedish Council for Building Research, Sweden, 1980. 130p.
8. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
9. Будадин О. Н. Новый метод определения термического сопротивления ограждающих конструкций. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2013, №3. С.9-15.
10. Вавилов В. П., Маринетти С., Нестерук Д. А. Тепловизионная оценка сопротивления теплопередаче строительных конструкций в нестационарных условиях. Дефектоскопия, 2009, №7. С.50-61.
11. Вавилов В. П., Лариошина И. А. Методические погрешности тепловизионного энергоаудита строительных сооружений. Вестник науки Сибири, 2012, № 5 . С.49–53.
12. Заголило С.А., Черенков Н.С., Семенов А.С. Проведение тепловизионного обследования как способ выявления дефектов конструкций строящихся объектов. Международный журнал экспериментального образования, 2016, № 7. С.76–79.

## References (transliterated)

1. DSTU B EN 13187:2011 Teplovi karakteristiki budivel'. Jakisne vijavlenija teplovih vidmov v ogorodzhual'nih konstrukcijah. Infrachervonij metod. Kiiv, Minregion Ukraïni, 2012. 33 p.
2. GOST R 54852-2011 Zdanija i sooruzhenija. Metod teplovizionnogo kontrolja kachestva teploizoljacii ograzhdajushhijh konstrukcij. Moscow: Standartinform, 2012. 16 p.
3. NiP 11-3-79 Stroitel'naja teplotekhnika. Moscow: CИTP Gosstroja SSSR, 1986. 32 p.
4. SNiP 23-02-2003 Teplovaja zashhita zdaniy, Moscow:: Gosstroj RF, 2004. 27 p.
5. DIN EN 13187-1999 Thermal Performance of Buildings – Qualitative detection of thermal properties in building envelopes – Infrared method. German Institute for Standardisation, 1999, 13 p.
6. Drozdov V. I., Suharev V. I. Termografija v stroitel'stve. Moscow: Strojizdat, 1987. 238 p.
7. Petersson B., Axen B. Thermography: Testing of Thermal Insulation and Airtightness of Buildings. Swedish Council for Building Research, Sweden, 1980. 130 p.
8. Vavilov V. P. Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol'. M.: ID Spekr, 2009. 544 p.
9. Budadin O. N. Novyj metod opredelenija termicheskogo soprotivlenija ograzhdajushhijh konstrukcij. Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol', 2013, No3. P. 9–15.
10. Vavilov V. P., Marinetti S., Nesteruk D. A. Teplovizionnaja ocenka soprotivlenija teploperedache stroitel'nyh konstrukcij v nestacionarnyh uslovijah. Defektoskopija, 2009, No7. P. 50–61.
11. Vavilov V. P., Larioshina I. A. Metodicheskie pogreshnosti teplovizionnogo jenergoaudita stroitel'nyh sooruzhenij. Vestnik nauki Sibiri, 2012, No 5. P. 49–53.
12. Zagolilo S.A., Cherenkov N.S., Semenov A.S. Provedenie teplovizionnogo obsledovanija kak sposob vyjavlenija defektov konstrukcij strojashhihsja ob'ektov. Mezhdunarodnyj zhurnal jekspierimental'nogo obrazovanija, 2016, No 7. P.76–79.

Поступила (received) 15/11/2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Стороженко Володимир Олександрович (Storozhenko Vladimir Aleksandrovich, Storozhenko Volodymyr Oleksandrovich)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри Фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>; e-mail: volodymyr.storozhenko@nure.ua

**Орел Роман Петрович (Orel Roman Petrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри Фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>; e-mail: roman.orel@nure.ua

**Мешков Сергій Миколаєвич (Meshkov Serhiy Mikolayovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри Фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>; e-mail: sergiy.meshkov@nure.ua

*М. Д. СУВОРОВА***РОЗРОБКА НАМАГНІЧУВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ЕМА ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ПОТУЖНИХ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

Виконані експериментальні дослідження, що направлені на розробку електромагнітно-акустичних перетворювачів з потужними джерелами магнітного поля. Розглянуто основні схеми конструкції та формування електромагнітного поля основними типами ЕМА перетворювачів. Шляхом моделювання стандартними пакетами програм встановлена можливість створення магнітного поляризованого поля джерел електромагнітно-акустичних перетворювачів до 2...3 Тл. Виконані модельні експерименти для аналізу характеристик ЕМА перетворювачів. Наведено опис використаних методологічних засобів. Розглянуто схеми підмагнічування. Виконано моделювання для ортогональної та паралельної схем підмагнічування. Розроблено концептуальні підходи щодо побудови постійних магнітів з не колінеарною орієнтацією векторів магнітної індукції. Запропоновано реалізацію підмагнічування на базі П-образного магніту. Наведено принципи формування потужних магнітних полів на базі постійного намагнічування. Визначено оптимальні геометричні та фізико-механічні параметри для моделі П-образного магніту. Розроблено макетний зразок потужного джерела магнітного поля для електромагнітно-акустичних перетворювачів. Наведено результати перевірки даних моделювання на макетному зразку.

**Ключові слова:** електромагнітно – акустичний перетворювач, моделювання, намагнічування, матеріал для досліджень, контроль, діагностика, товщинометрія.

*М. Д. СУВОРОВА***РАЗРАБОТКА НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ ЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

Выполнены экспериментальные исследования, направленные на разработку электромагнитно - акустических преобразователей с мощными источниками магнитного поля. Рассмотрены основные схемы конструкции и формирования электромагнитного поля основными типами ЕМА преобразователей. Путем моделирования стандартными пакетами программ установлена возможность создания магнитного поляризованного поля источников электромагнитно - акустических преобразователей до 2 ... 3 Тл. Выполнены модельные эксперименты для анализа характеристик ЕМА преобразователей. Приведено описание использованных методологических средств. Рассмотрены схемы подмагничивания. Выполнено моделирование для ортогональной и параллельной схем подмагничивания. Разработаны концептуальные подходы к построению постоянных магнитов с не коллинеарной ориентацией векторов магнитной индукции. Предложена реализация подмагничивания на базе П-образного магнита. Приведены принципы формирования мощных магнитных полей на базе постоянного намагничивания. Определены оптимальные геометрические и физико-механические параметры модели П-образного магнита. Разработан макетный образец мощного источника магнитного поля для электромагнитно - акустических преобразователей. Приведены результаты проверки данных моделирования на макетном образце.

**Ключевые слова:** электромагнитно – акустический преобразователь, моделирование, намагничивания, материал для исследований, контроль, диагностика, толщинометрия.

*М. D. SUVOROVA***DEVELOPMENT OF MAGNETIC SOURCES FOR EMO CONVERTERS ON THE BASIS OF POWERFUL PERMANENT MAGNETS**

Experimental studies aimed at the development of electromagnetic - acoustic transducers with powerful sources of magnetic field. The basic schemes of the design and formation of electromagnetic transducers are considered by the main types of EMA to be repetitive. By modeling standard software packages, the possibility of creating a magnetic polarizing field of sources of electromagnetic - acoustic transducers up to 2 ... 3 T. Model experiments were performed to analyze the characteristics of EMA converters. The description of the used methodological tools is given. Magnetization schemes are considered. Simulation was performed for orthogonal and parallel magnetization circuits. Conceptual approaches to the construction of permanent magnets with non-collinear orientation of the magnetic induction vectors have been developed. The implementation of magnetization based on a U-shaped magnet is proposed. The principles of the formation of powerful magnetic fields based on constant magnetization are given. The optimal geometric and physical and mechanical parameters of the U-shaped magnet model are determined. A prototype of a powerful source of a magnetic field for electromagnetic - acoustic transducers is developed. The results of verification of simulation data on a prototype are presented.

**Key words:** electromagnetic – acoustic converter, modeling, magnetization, research material, control, diagnostics, thickness gauge.

**Вступ.** В порівнянні з традиційним використанням контактної ультразвукової методу контролю електромагнітно – акустичний (ЕМА) метод ультразвукової контролю [1] має ряд переваг, в першу чергу економічних [2–3]. Проте для його ефективної роботи необхідні потужні джерела магнітного поля. Відомі джерела дозволяють отримувати індукцію 0,6...0,7 Тл [1], що недостатньо для проведення якісної оцінки металовиробів при товщинометрії, дефектоскопії та діагностиці. Тому дослідження, що направлені на вирішення проблеми підвищення величини індукції поляризованого магнітного поля джерела ЕМА є актуальними.

Метою роботи є вдосконалення ЕМА, обладнаних постійними джерелами магнітного поляризованого поля.

**1. Експериментальне дослідження залежності ефективності збудження і прийому ультразвукових хвиль ЕМА способом від величини поляризованого поля.** Експериментально дослідженню ефективності подвійного ЕМА

перетворення в залежності від величини поляризованого поля проводились на установці, що дозволяє створювати як паралельні, так і ортогональні по відношенню до поверхні феромагнетика постійні магнітні поля з регульованою амплітудою. Схема установки приведена на рис. 1. Паралельне поверхні об'єкта контролю поляризоване поле створювалося за допомогою П-подібного електромагніту, на полюси якого була встановлена сталеві феромагнітна плита. Для ортогонального намагнічування застосовувалася система з постійних магнітів, що створює в матеріалі об'єкта контролю магнітну індукцію близько 1,2 Тл при зазорі між намагнічующою системою і поверхнею феромагнетика 10 мм. Первинні ЕМА перетворювачі розташовувалися на поверхні сталеві плити між полюсами електромагніта, а також в зазорі між системою з постійних магнітів і поверхнею плити.

© М. Д. Суворова, 2019

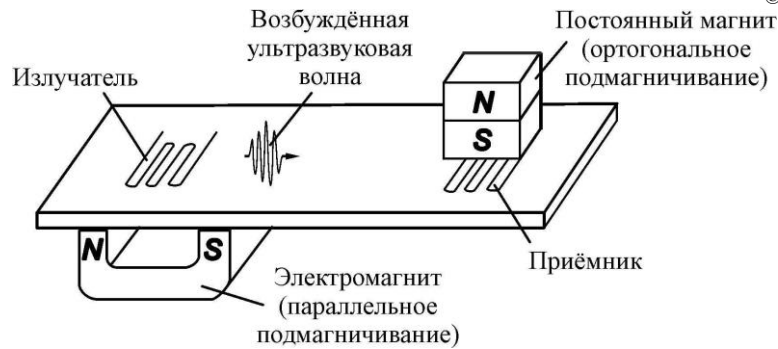


Рис. 1 – Спрощена схема експериментальної установки

На рис. 2 представлена отримана експериментальна залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни паралельного поляризованого поля. Графік 1 на рис. 2 отриманий при розміщенні випромінювача над електромагнітом, що створює паралельне поляризоване поле, а приймач розташовувався під намагнічуючою системою, що створює ортогональне поляризоване поле. Регулювання амплітуди паралельного поляризованого поля в цьому експерименті проводилося зміною струму в обмотці електромагніту. При цьому створювана системою з постійних магнітів магнітна індукція лишалася незмінною (відстань до поверхні пластини не змінювалася) і становила 1,2 Тл. Графік 2 на рисунку 2 отриманий при заміні місцями приймального та випромінювального первинних ЕМА перетворювачів: випромінювач розташовувався в ортогональному поляризованому полі, а приймач в паралельному.

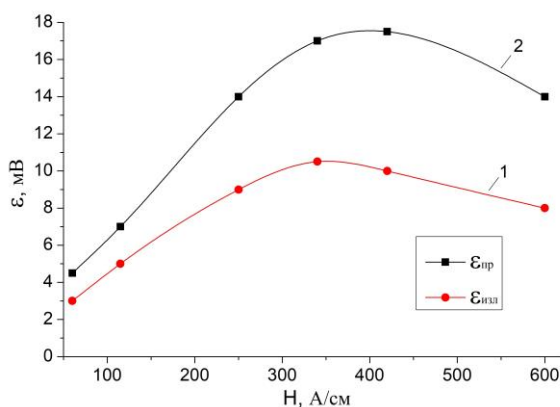


Рис. 2 – Залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни паралельного поляризованого магнітного поля

На рис. 3 представлена залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни ортогонального поляризованого поля. Як і в попередньому експерименті, графік 1 на рис. 3 отриманий при розміщенні

випромінювача в паралельне поверхні феромагнетика поляризоване поле. Приймач розташовувався під системою з постійних магнітів, що створює ортогональне поляризоване поле. Зміна величини ортогонального поляризованого поля проводилося шляхом зміни зазору між системою з постійних магнітів і поверхнею пластини. Графік 2 на рисунку 3 отримано для випадку, коли випромінювач і приймач мінялися місцями. Напруженість паралельного поляризованого поля залишалася постійною і рівною 300 А / см.

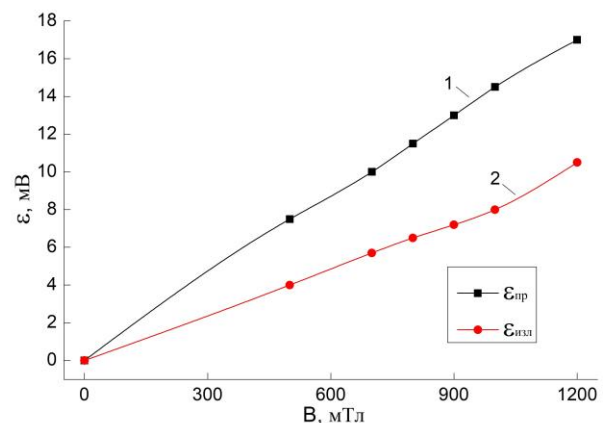


Рис. 3 – Залежність ефективності ЕМА перетворення від зміни ортогонального поляризованого поля

Вимірювання амплітуди магнітного поля в процесі експериментів проводилося мілітесламетром в місцях розташування первинних ЕМА перетворювачів (приймача і випромінювача).

За результатами проведених експериментів можна зробити наступні висновки. Оптимальною амплітудою поля при паралельному намагнічуванні є величина 300 – 400 А / см. При напруженості поля менш 250 А / см рівень сигналу падає більш ніж в 5 разів як при порушенні, так і при прийомі ультразвукових сигналів.

Для ефективного збудження і прийому ультразвукових хвиль ЕМА методом при ортогональному намагнічуванні необхідно створити в

матеріалі феромагнетика магнітну індукцію понад 0,9 Тл. Отримані експериментальні дані відповідають даним, отриманих авторами в роботі [4]

**2. Математичне моделювання намагнічувального джерела ЕМА перетворювачів.** Конструкція ЕМА перетворювачів включає в себе намагнічує систему, яка створює поляризоване поле, необхідне для ЕМА перетворення. Під робочою зоною розуміється область, в якій відбувається ЕМА перетворення, тобто в ній створюється поляризоване поле і розташовується ЕМА перетворювач. Відомо, що як для електродинамічного, так і для магнітострикційного механізмів ЕМА перетворення зазвичай застосовуються П-подібні постійні магніти або електромагніти.

При електродинамічному механізмі первинні ЕМА перетворювачі розташовуються між полюсами електромагніту, а при електродинамічному механізмі – в зазорі між полюсами П-образного магніту і поверхнею об'єкта контролю. Геометричні параметри П-подібних магнітів для різних механізмів ЕМА перетворення істотно розрізняються. Для електродинамічного механізму необхідно збільшити величину зазору між полюсами магніту і поверхнею об'єкта, збільшити поперечний переріз полюсів до розмірів необхідної робочої зони (розмірів первинних ЕМА перетворювачів), а міжполюсне доцільно зменшити; при магнітострикційному механізмі необхідно, щоб міжполюсна відстань була достатньою для розміщення первинних ЕМА перетворювачів. При цьому поперечний переріз полюсів і величину зазору між полюсами магніту і поверхнею об'єкта контролю можна зменшити.

З вищесказаного випливає, що П-подібна намагнічуюча система вимагає визначення геометричних і магнітних властивостей для конкретного випадку її використання. Розрахунок магнітних і геометричних параметрів П-подібних намагнічуючих систем аналітичним методом є нетривіальним завданням. Тому розрахунок конструктивно більш складних систем з великою часткою ймовірності стає неможливим. Розвиток останнім часом комп'ютерної техніки, об'єднання ЕОМ в кластери для створення великих обчислювальних потужностей, а також поява потужних програмних пакетів для чисельного моделювання магнітних полів, таких як ANSYS і Femm, дозволяють розрахувати магнітні та геометричні параметри намагнічувальних системи будь-якої складності.

**3. Типові схеми намагнічування.** У техніці зазвичай застосовуються намагнічуючі системи ЕМА перетворювачів, що представляють собою або постійний магніт з вектором намагніченості, спрямованим по нормалі до поверхні об'єкта контролю для електродинамічного механізму ЕМА перетворення, або П-подібні постійні магніти (або електромагніти) для магнітострикційного механізму ЕМА перетворення. Використання в автоматизованих ЕМА системах для діагностики довгомірних феромагнітних об'єктів намагнічують систем з постійних магнітів краще, так як в цьому випадку знижується енергоспоживання і вирішується завдання утримання системи на поверхні феромагнетика.

**3.1. Ортогональне підмагнічування (електродинамічний механізм ЕМА перетворення).** Як було показано раніше, для ефективного ЕМА перетворення необхідно, щоб намагнічує система ЕМА перетворювача створювала магнітну індукцію близько 2 Тл для ортогонального намагнічування і напруженість магнітного поля близько 300 А / см для випадку паралельного намагнічування. Результати моделювання в програмних комплексах Femm і ANSYS показали, що створюване типовими намагнічувальними системами поляризоване поле при товщині об'єкта контролю більше 16 мм недостатньо для ефективного ЕМА перетворення. Так, намагнічуюча система, що представляє собою одиночний постійний магніт з напрямком намагнічування, перпендикулярним до поверхні об'єкта контролю (рис. 4) здатна створювати магнітну індукцію, що не перевищує 0,8–0,9 Тл при зазорі між намагнічуючою системою і поверхнею об'єкта 10 мм. При цьому розміри системи складають 100×100×100 мм при масі близько 8 кг.

При спробі зменшити розміри системи або падає величина магнітної індукції, або істотно зменшуються розміри робочої зони: в максимальному і однорідному полі знаходиться лише мала частина первинного ЕМА перетворювача (рис. 5).

Якщо розглядати П-подібний магніт (рисунок 6) то при тій же масі він створює при зазорі 10 мм ще меншу магнітну індукцію, спрямовану по нормалі до поверхні намагнічувальних об'єкта, тому для електродинамічного способу ЕМА перетворення П-подібний магніт підходить в найменшій мірі.

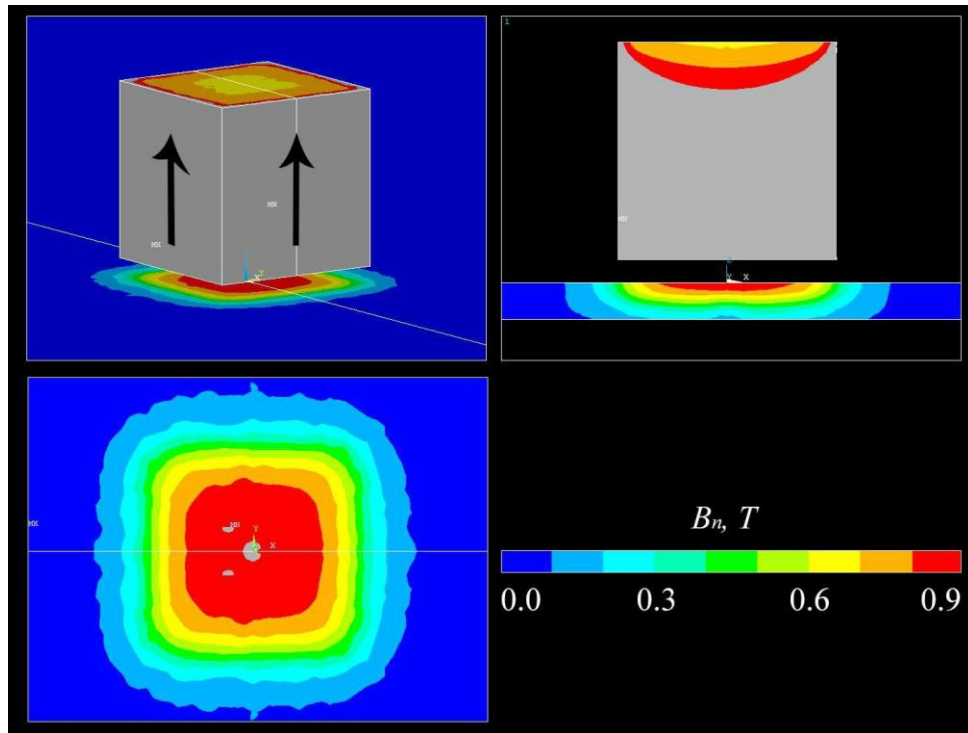


Рис. 4 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об'єкта контролю в робочій зоні постійного магніту розмірами  $100 \times 100 \times 100$  мм з вектором намагніченості, спрямованим по нормалі до об'єкта контролю

**3.2. Паралельне намагнічування (магнітострикційний механізм ЕМА перетворення).** Для паралельного підмагнічування також можна використовувати одиночний магніт, напрямком поляризації магніту паралельно поверхні об'єкта контролю. Результати моделювання одиночного магніту розмірами  $100 \times 200 \times 45$  і масою близько 8 кг представлені на рис. 7

Аналіз рис. 7 показує, що максимальне значення тангенціальної складової магнітного поля в робочій зоні намагнічувальної системи не перевищує  $20 \text{ A / см}$ . При цьому поле істотно неоднорідне і використовувати таку намагнічуючу систему для ЕМА перетворювачів малоефективно.

На рисунку 8 представлений розрахунок П-подібної намагнічувальної системи з постійних магнітів, маса системи складає близько 6 кг. Міжполюсна відстань становить 60 мм, воно було вибрано виходячи з розмірів первинних ЕМА перетворювачів для збудження і прийому хвиль

Лемба і Релея. Поле в робочій зоні намагнічувальної системи досить однорідне, але значення напруженості магнітного поля не перевищує  $10 \text{ A / см}$ .

Таким чином, для ортогонального намагнічування об'єкта контролю з товщиною стінки більше 16 мм можна використовувати намагнічуючу систему, що представляє собою одиночний магніт з напрямком поляризації, перпендикулярним до поверхні об'єкта контролю, але така система буде мати велику масу і недостатнім для максимально ефективного ЕМА перетворення поляризуючим полем. Застосування типових намагнічують систем з постійних магнітів для паралельного намагнічування об'єктів з товщиною стінки більше 16 мм не є доцільним з огляду на те, що вони не здатні забезпечити напруженість магнітного поля  $300 \text{ A / см}$  без істотного збільшення маси намагнічувальної системи.

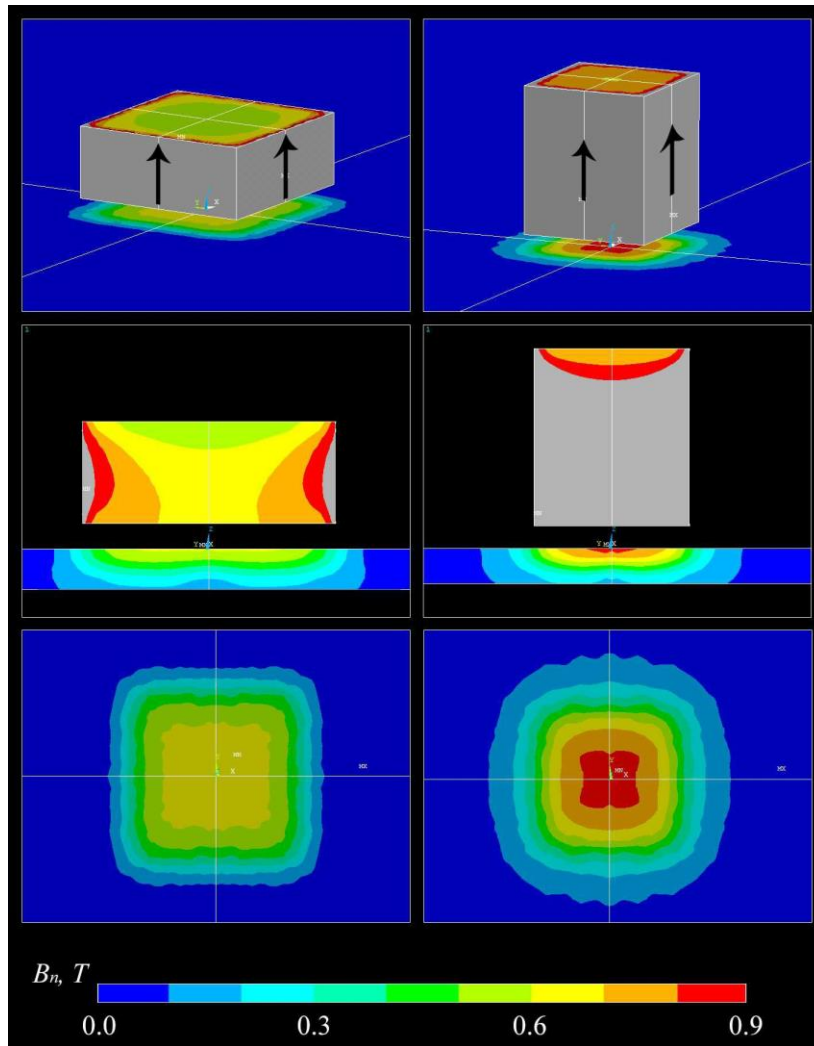


Рис. 5 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об'єкта контролю в робочих зонах постійних магнітів розмірами 100×100×40 мм і 70×70×80 мм з векторами намагніченості, спрямованими по нормалі до об'єкту контролю

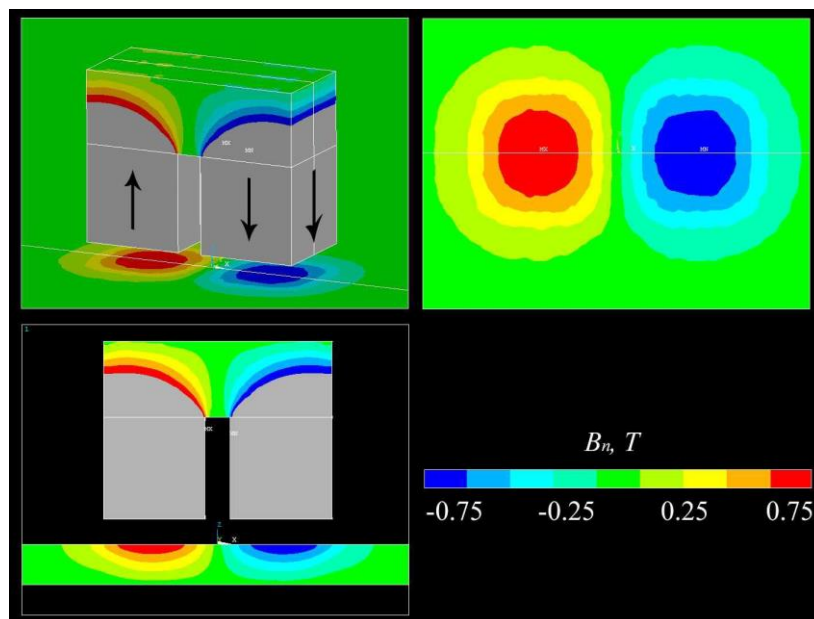


Рис. 6 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції на поверхні об'єкта контролю в робочих зонах постійного П-подібного магніту

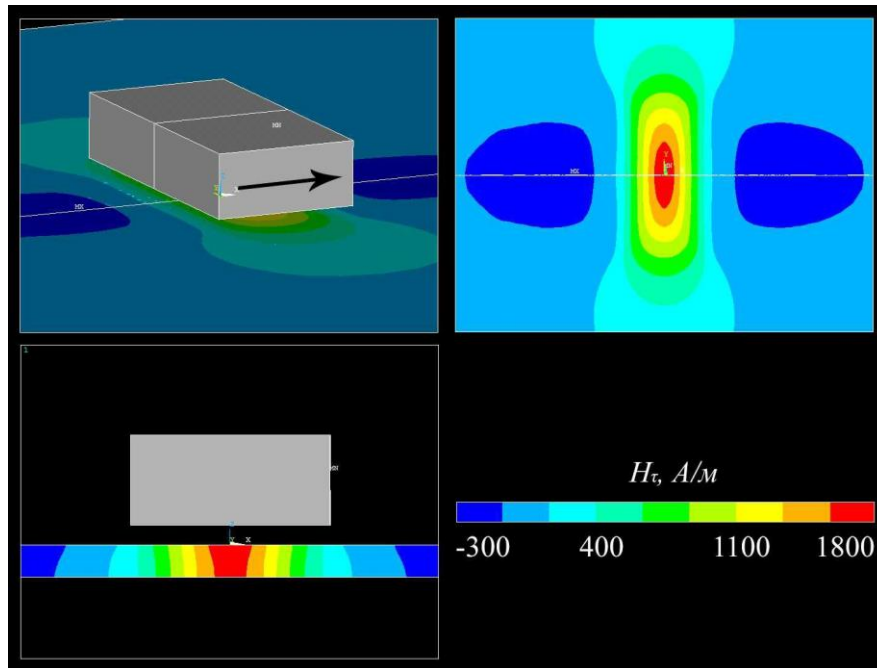


Рис. 7 – Розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля від намагнічувальної системи, що представляє собою одиночний магніт з розмірами 100×200×45 мм

**4. Оптимізація геометричних і магнітних властивостей джерела на основі П-подібного постійного магніту.** Для вирішення завдання створення ортогонального і паралельного поляризуєтьсяючої поля на об'єктах контролю з товщиною стінки більше 16 мм за допомогою П-

образної намагнічуючої системи з постійних магнітів була проведена серія розрахунків в система ANSYS. Геометрія і розміри намагнічуючої системи були оптимізовані з метою мінімізації її маси при досягненні оптимальної величини паралельного і ортогонального поляризують полів.

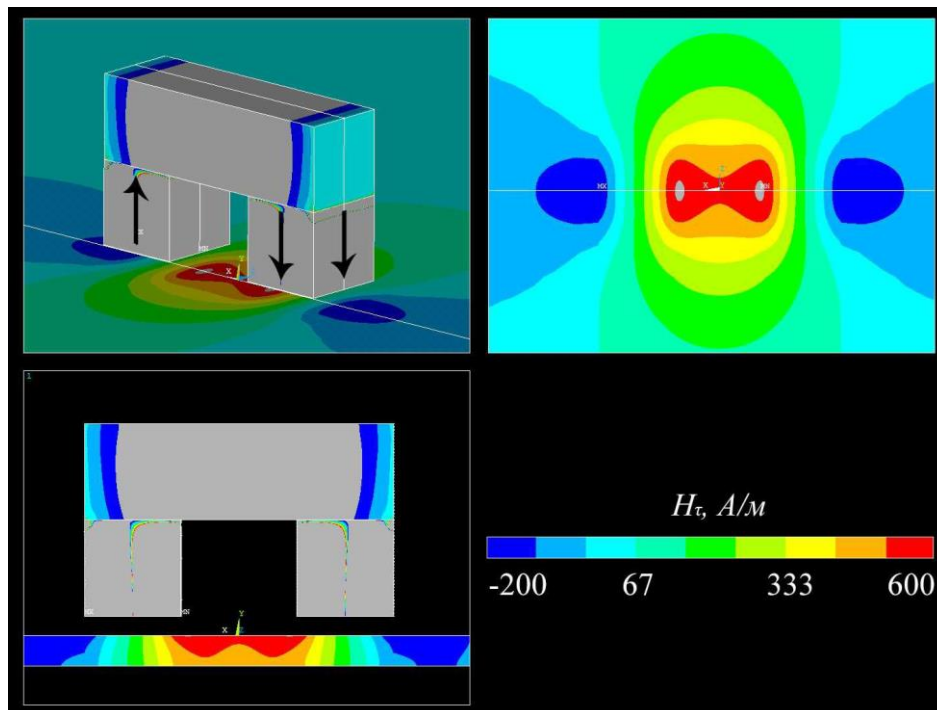


Рис. 8 – Розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля від П-подібної системи з постійних магнітів

На рис. 9 наведено зовнішній вигляд моделі П-подібної намагнічувальної системи. Система складається з двох полюсів, виконаних з сучасних

постійних магнітів, а також включає в себе ярмо з магнітом'якого матеріалу (пермендюр). Напрямку поляризації магнітів показано стрілочками.



Таку намагнічувальну систему можна використовувати як для магнітострикційного (паралельне поверхні феромагнетика магнітне поле), так і для електродинамічного (ортогональне магнітне поле) механізмів ЕМА перетворення. Результати розрахунків і оптимізації представлені на рис. 10 робоча область відзначена на рисунку 10 рамкою.

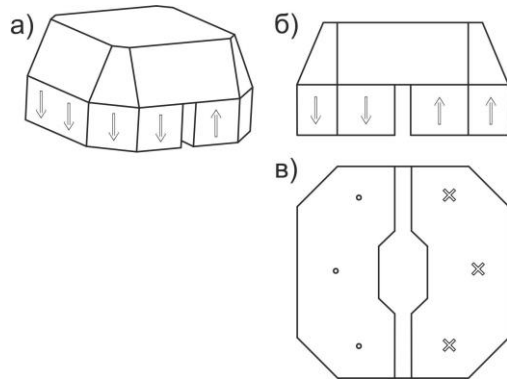


Рис. 9 – Зовнішній вигляд оптимізованої П-подібної намагнічувальної системи: а – тривимірне представлення, б – вид збоку, в – вид знизу

Тангенціальна по відношенню до поверхні феромагнетика складова напруженості магнітного поля в робочій області між полюсами П-подібного магніту для даної намагнічувальної системи становить близько 350 А / см (рисунок 10а). Нормальна складова індукції в зазорі між полюсом П-подібного магніту і поверхнею феромагнетика складає близько 1 Тл (рисунок 10б). При цьому маса системи становить 15 кг. Величина таких поляризованих полів достатня для ефективного збудження і прийому ультразвуку в металах, але велика маса намагнічувальної системи ускладнює її застосування в ручних і автоматизованих засобах ЕМА діагностики.

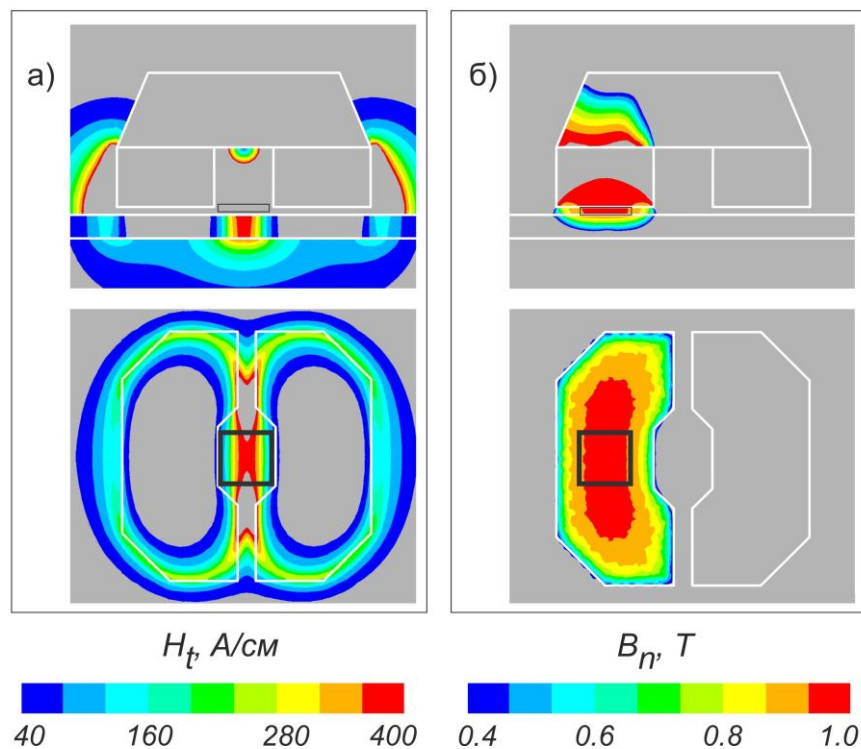


Рис. 10 – Розподілу магнітного поля від П-подібної намагнічувальної системи: а – розподіл тангенціальної складової напруженості магнітного поля  $H_t$ , вид збоку і зверху; б – розподіл нормальної складової індукції  $B_n$ , вид збоку і зверху

**4.1. Створення сильних магнітних полів за допомогою сучасних постійних магнітів.** Ще відносно недавно отримання високих полів було можливо тільки за допомогою надпровідних або охолоджуваних соленоїдів. Однак відкриття в області нових магнітних матеріалів, заснованих на рідкоземельних металах, дозволили створити намагнічуючі системи з сильними магнітними полями. Основною відмінною рисою таких

намагнічують систем є неколінеарне розташування магнітів – поля від постійних магнітів, спрямованих зустрічно, накладаються один на одного і підсумовуються, при цьому магніти не руйнуються і не розмагнічуються. Цей ефект став можливий завдяки гігантській магнітній анізотропії сучасних постійних магнітів – коерцитивної сила по намагніченості у сучасних постійних магнітів може становити більше  $2,6 \cdot 10^6 \text{ А / м}$ .

Більш докладно метод створення сильних магнітних полів описаний в роботі К. Хальбаха [5]. Суть методу полягає в розташуванні постійних магнітів навколо центрального обсягу простору, в якому «концентрується» поле, і в знаходженні таких напрямків поляризації постійних магнітів, при яких поле в заданому об'ємі простору буде максимальним (рисунок 11). Згідно [6] оптимальний напрямок поляризації кожного магніту можна обчислити з рівняння:

$$B_z = \left( \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \right) \cdot M \cdot (2\cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi), \quad (1)$$

де:  $B_z$  – результуюча магнітна індукція, Тл, створювана магнітом, з напрямком поляризації відповідно з рисунком 12

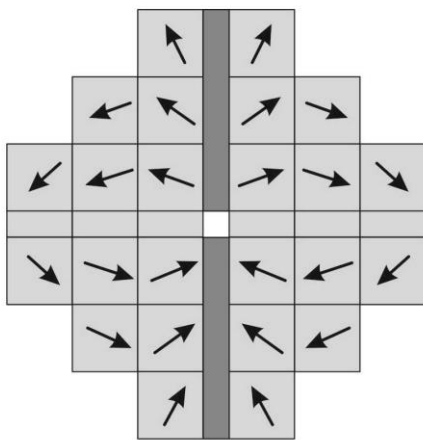


Рис. 11 – Схема намагнічувальної системи, що створює індукцію 4,5 Тл (стрілками вказані напрямки поляризації магнітів)

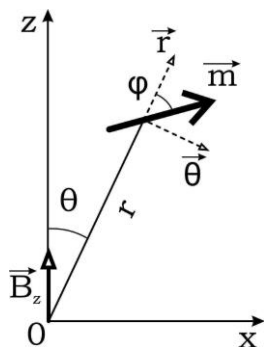


Рис. 12 – Внесок магнітного моменту  $\mathbf{m}$  у полі  $B_z$  в центральній точці  $O$

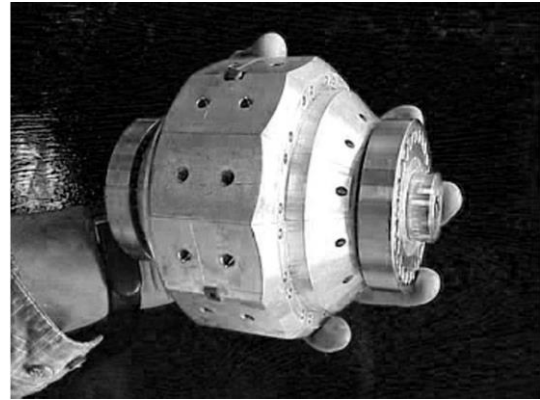


Рис. 13 – Зовнішній вигляд намагнічувальної системи, що створює індукцію 4,5 Тл

Тоді результуюча магнітна індукція  $B_z$  буде максимальна при

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{2}\operatorname{tg}\phi. \quad (2)$$

Система створює в локальній області магнітну індукцію понад 4,5 Тл. Напрямок поляризації кожного магніту в цій системі вибиралося виходячи з умови, що така поляризація дає максимально можливе вертикальне поле в центральній точці намагнічувальної системи.

**4.2. Визначення оптимальних геометричних і магнітних властивостей неколінеарної намагнічувальної системи з ортогональним постійним поляризуючим полем.** Намагнічувальна система для ЕМА перетворювача повинна створювати поляризуюче поле на поверхні сталеві пластини (або труби) і знаходитися на відстані 8 – 10 мм від поверхні. Таким чином, від намагнічувальної системи, показаної на рисунку 11, можливо використовувати тільки половину (наприклад, верхню), розташувачи її на відстані 8 – 10 мм від поверхні сталеві пластини. Але в такому випадку напрямок поляризації кожного магніту вже не буде оптимальним. Рівняння (2) – це не що інше, як рівняння силових ліній від точкового диполя. Дійсно, поле уздовж силової лінії більше поля уздовж будь-якого іншого напрямку. Таким чином, якщо в точці, де передбачається створити максимальне поле, помістити точковий диполь з поляризацією вздовж створюваного поля, то силові лінії цього диполя вкажуть оптимальний напрямок поляризації магнітів, які створюють необхідний поле (рис. 14).

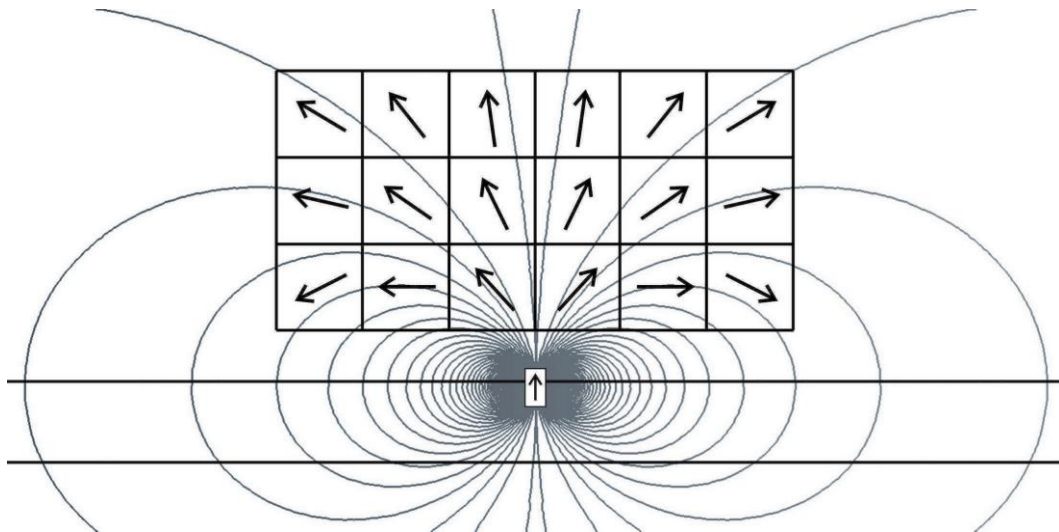


Рис. 14 – Напрямки поляризації магнітів, збудовані вздовж силових ліній диполя

На рис. 15 показано розподіл магнітного поля від намагнічувальної системи з оптимальними напрямками поляризації магнітів. Результати отримані в програмі Femm 4.2.

Як видно з рис. 15, така, що намагнічує система здатна намагнітити матеріал феромагнетика до індукції, що перевищує 2 Тл.

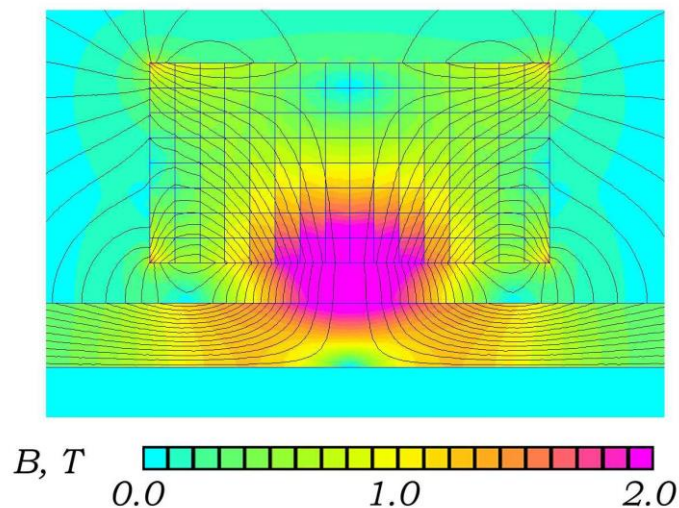


Рис. 15 – Розподіл магнітного поля від «ідеальної» намагнічувальної системи з оптимальними напрямками поляризації магнітів

Необхідно врахувати, що індукція в центральних магнітах також перевищує значення 2 Тл, тому велика ймовірність їх розмагнічування, і в реальному виробі необхідно використовувати магніти з високою коерцитивною силою по на намагніченість. На рисунку 16 крива 1 показує розподіл нормальної складової індукції у феромагнетик у робочій області під ідеальної намагнічувальної системою (рисунок 15). Пунктирними лініями позначена межа робочої зони, в якій розташовуються первинні ЕМА перетворювачі (40×40 мм).

З графіка видно, що магнітна індукція, створювана такою намагнічуючою системою, становить близько 2 Тл. Таким чином, дана

намагнічує система підходить для оптимального збудження і прийому ультразвукових хвиль в металах. Але виготовити таку систему досить складно: необхідні десятки видів магнітів з різними напрямками поляризації і складні оправлення для збірки. Шляхом послідовного зменшення кількості елементів і усереднення напрямків поляризації магнітів в кожному елементі була отримана система, показана на рис. 17 Залежність нормальної складової індукції у феромагнетик від відстані до центру системи намагнічування демонструє крива 2 на рис. 16.

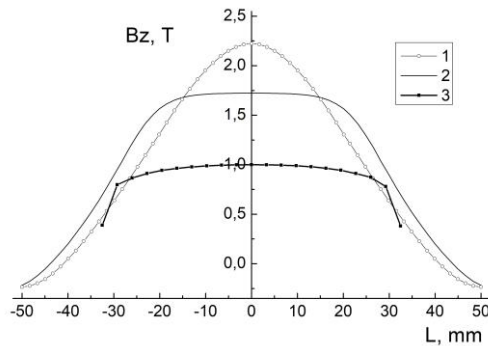


Рис. 16 – Розподіл нормальної складової індукції по відношенню до поверхні об'єкта контролю в робочих областях систем намагнічування, межі робочих областей показані пунктирними лініями: 1 – «ідеальна» намагнічуюча система (рисунок 15); 2 – спрощена система намагнічування (рисунок 17); 3 – П-подібна намагнічуюча система (робоча область розташовується під полюсом)

Як видно з рисунків, індукція в робочій області під такою намагнічуючою системою становить 1,55 Тл, а поле досить однорідне. Для порівняння, крива 3 на рисунку 16 показує залежність нормальної складової індукції у феромагнетику від відстані до центру полюса П-подібного магніту, показаного на рисунках 9 і 10. Маса спрощеної системи намагнічування складає 3 кг, а простота конструкції відкриває великі можливості для промислового виготовлення.

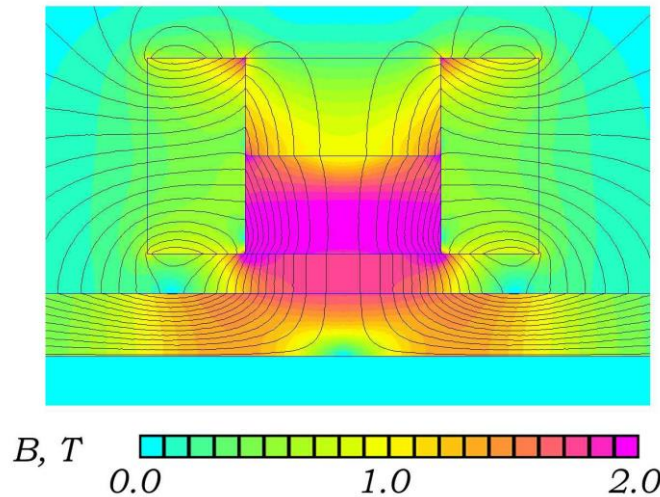


Рис. 17 – Розподіл магнітного поля від спрощеної системи намагнічування, придатної для промислового виготовлення

**4.3. Експериментальна перевірка ефективності оптимізованої системи намагнічування з ортогональним постійним поляризованим полем.** Намагнічує система, аналогічна показаній на рисунку 17 була виготовлена з магнітів прямокутної форми. Магнітна система представляє собою сердечник з магнітом'якого матеріалу (пермендюр) кубічної форми 40×40×40 мм, оточений з усіх боків, за винятком робочої, постійними високоенергетичних магнітами так, що напрямки поляризації магнітів були спрямовані всередину сердечника. Схема і фотографія системи представлені на рисунках 18 і 19 відповідно. Розміри системи складають 90×90×40 мм, а вага без оправлення не перевищує 2,8 кг. Магнітне поле в робочій області сягає 1,3 Тл, що добре узгоджується з розрахунками. Таким чином, для ЕМА перетворювачів з ортогональним підмагнічуванням можна використовувати неколінеарну конфігурацію сучасних постійних магнітів. Така конфігурація дозволяє знизити масу намагнічувальної системи ЕМА перетворювача до 3 кг, при цьому ефективність ЕМА перетворення з використанням цієї системи

буде перевершувати ефективність з використанням П-подібної системи.

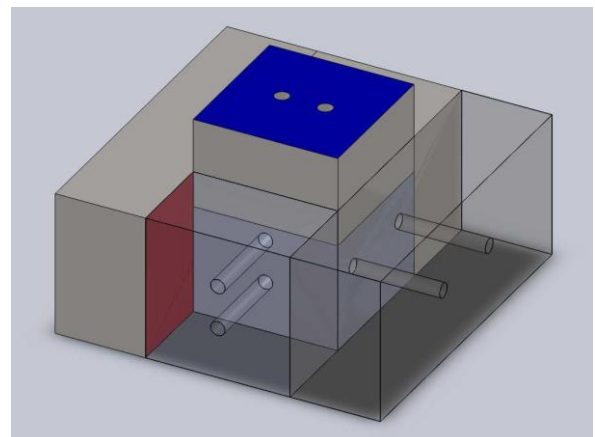


Рис. 18 – Схема реальної джерела намагнічування ЕМА перетворювача



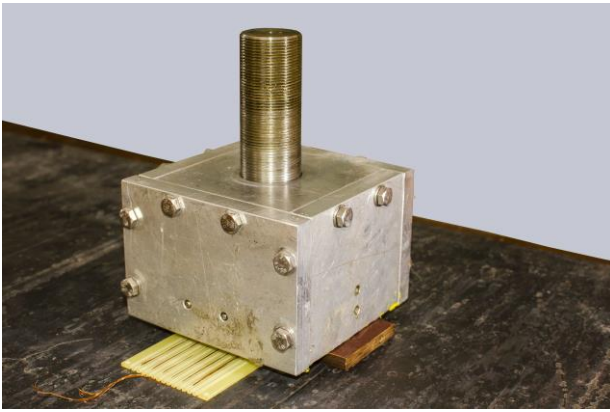


Рис. 19 – Фотографія макета намагнічувальної системи ЕМА перетворювача

### Висновки

1. Встановлено, що типові намагнічуючі системи ЕМА перетворювачів мають неоптимальні, завищені значеннями масогабаритних характеристик і силами магнітного тяжіння до феромагнітного об'єкту контролю. Крім цього, вони не забезпечують створення в матеріалі феромагнетика необхідного для ефективного ЕМА перетворення поляризованого поля.

2. Для ортогонального підмагнічування доцільно використовувати намагнічуючі системи з постійних магнітів, побудовані за принципом неколінеарного розташування постійних магнітів з гігантською магнітною анізотропією, для паралельного – альтернативні способи створення поляризованого поля, наприклад імпульсне намагнічування.

3. На підставі чисельного моделювання та експериментальних досліджень запропоновано конструкція намагнічуючого пристрою, заснованого на неколінеарній конфігурації постійних магнітів, що дозволяє отримати ортогональне до поверхні феромагнетика однорідне магнітне поле у всій робочій області ЕМА перетворювача. При цьому в феромагнетик незалежно від його товщини можливе

створення магнітної індукції до 2 Тл при масі намагнічувальної системи не більше 3-х кг, що забезпечує майже десятикратне збільшення співвідношення сигнал / завада при генерації і прийомі ультразвукових хвиль ЕМА методом в порівнянні з типовими системами намагнічування.

### Список літератури

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. В. В. Клюев (ред). Москва, Машиностроение. 2004.
2. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. В мире неразрушающего контроля. №3, С. 8–10.
3. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок. Территория NDT. 1, 2014. С. 42–43.
4. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Комаров В.А. О механизме ЭМА преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при различных частотах // Дефектоскопия. 1988. №10. С. 77–82.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear instruments and methods. 1980. Vol. 169. P.1–10.
6. Жаков С.В. Получение максимальных магнитных полей с помощью постоянных магнитов // Физика металлов и металловедение. 2003. Т.96. №6. С. 18–22.

### References(transliterated)

1. Ermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayushij kontrol: Spravochnik: V 7 v. Vol 3: Ultrazvukovoj kontrol. V. V. Klyuev (red). Moscow, Mashinostroenie. 2004.
2. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produkcii. V mire nerazrushayushego kontrolya. No3, P. 8–10.
3. Semerenko A.V. Primenenie EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevatelej kotelnyh ustanovok. Territoriya NDT. 1, 2014. P. 42–43.
4. Ilyasov R.S., Babkin S.E., Komarov V.A. O mehanizme EMA preobrazovaniya voln Releya v ferromagnetikah pri razlichnyh chastotah // Defektoskopiya. 1988. No10. P.77–82.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear instruments and methods. 1980. Vol. 169. P.1–10.
6. Zhakov S.V. Poluchenie maksimalnyh magnitnyh polej s pomoshyu postoyannyh magnitov // Fizika metallov i metallovedenie. 2003. Vol.96. – No6. – P. 18–22.

Поступила (received) 25.11.2019

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Суворова Марія Денисовна (Суворова Мария Денисовна, Suvorova Maria Denisivna)** – магістрант кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

**Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, Н. Я. ЗАЙЧЕНКО, А. Д. МЕНЯЙЛО**

### **АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОЛОК, ПРИМЕНЯЕМЫХ В 3D ПРИНТЕРАХ**

В статье рассмотрена математическая модель диэлектрической проволоки для 3D принтера на выходе экструдера в виде уравнения теплопроводности. В цилиндрических координатах его решения представляется с помощью функций Бесселя. Для его решения во временной области используется преобразование Лапласа. Анализ полученных решений позволил определить характер зависимости распределения температуры как в области сечения, так и по длине проволоки от теплофизических параметров и скорости. Полученные результаты могут быть применены для решения дальнейших оптимизационных задач по улучшению качества печати FDM 3D-принтеров. Перспективы улучшения качества 3D печати связаны с учетом в геометрии сопла экструдера и регулировании скорости движения диэлектрической проволоки.

**Ключевые слова:** тепловые методы, анализ теплофизических параметров, преобразование Лапласа, уравнение теплопроводности, 3D печать, диэлектрическая проволока

**Ю. Є. ХОРОШАЙЛО, Н. Я. ЗАЙЧЕНКО, О. Д. МЕНЯЙЛО**

### **АНАЛИЗ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ДРОТІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В 3D ПРИНТЕРАХ**

В статті розглянута математична модель діелектричного дроту для 3D принтера на виході екструдера у вигляді рівняння теплопровідності. У циліндричних координатах його рішення надається за допомогою функції Бесселя. Для його рішення у часовій області використовується перетворення Лапласа. Аналіз отриманих результатів дозволив визначити характер залежності розподілу температури як в області перерізу, так і по довжині дроту від теплофізичних параметрів і швидкості. Отримані результати можуть бути застосовані для рішення подальших оптимізаційних задач з покращення якості друку FDM 3D принтерів. Перспективи покращення якості 3D друку пов'язані із врахуванням геометрії сопла екструдера і регулюванням швидкості руху діелектричного дроту.

**Ключевые слова:** теплові методи, аналіз теплофізичних параметрів, перетворення Лапласа, рівняння теплопровідності, 3D друк, діелектричний дріт.

**Ye. HOROSHAILO, N. ZAYCHENKO, A. MENYALO**

### **DIELECTRIC WIRE FOR 3D PRINTER THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS**

The article considers a mathematical model of a dielectric wire for a 3D printer at the exit of an extruder in the form of an equation of thermal conductivity. In cylindrical coordinates, its solutions are represented using Bessel functions. To solve it in the time domain, the Laplace transform is used. The analysis of the obtained solutions made it possible to determine the nature of the dependence of the temperature distribution both in the region of the section and along the length of the wire on the thermophysical parameters and speed. The results obtained can be used to solve further optimization problems to improve the print quality of FDM 3D printers. Prospects for improving the quality of 3D printing are associated with taking into account the geometry of the extruder nozzle and controlling the speed of the dielectric wire.

**Keywords:** thermal methods, thermo physical parameters, Laplace transformation, heat equation, 3D printing, dielectric wire

**Введение.** Качество 3D печати зависит от многих параметров. В первую очередь, конечно же от качества расходных материалов. Пластик для 3D-печати должен, с одной стороны, обеспечивать постоянный диаметр на любом участке прутка, а с другой, однородность, без воздушных пузырей и инородных частиц, обладающий вполне определенными теплофизическими характеристиками. Так, например, увеличение скорости печати должно сопровождаться увеличением температуры сопла, чтобы пластик успевал плавиться. Однако по закону сохранения энергии, если греть пластик в 2-3 раза быстрее, то и охлаждаться он будет настолько же медленнее. Иначе возможны дефекты, вызванные оплыванием пластика, особенно, если использовать пластиками с низкой температурой отвердения.

Анализ и оптимизация этих теплофизических характеристик позволяет существенно повысить качество печати.

**Анализ основных исследований и публикаций.** В последнее десятилетие технологии быстрого прототипирования получили широкое распространение. Эти технологии осваивают такие промышленные гиганты, как General Electric и Siemens и в различных странах открывают исследовательские центры [1].

3D-печать используется для производства очень широкого спектра вещей: от прототипов деталей для систем авионики и оборудования промышленности, печати имплантатов в медицине и хирургии, и до целого ряда предметов быта, гаджетов и игрушек.

Однако при изготовлении различных изделий существенное влияние на их качество оказывает контроль параметров диэлектрической проволоки, подаваемой в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия.

Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала (рис. 1). Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением.

© Ю.Е. Хорошайло, Н.Я. Зайченко, А.Д. Меняйло, 2019

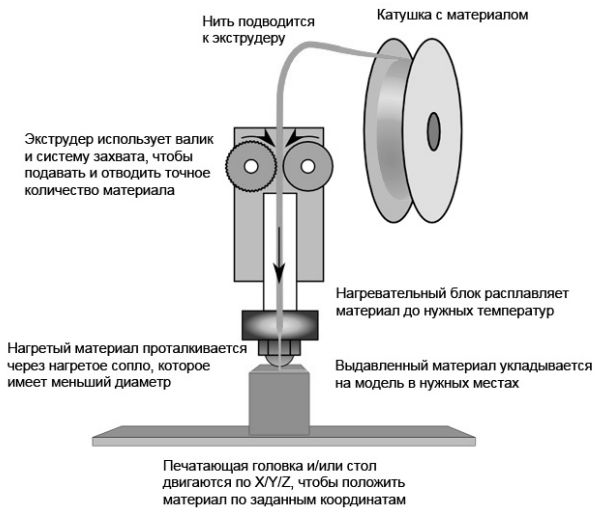


Рис. 1 – Схематическое изображение работы FDM 3D-принтера

В качестве расходных материалов доступны всевозможные термопластики и композиты, включая ABS, PLA, поликарбонаты, полиамиды, полистирол и многие другие. Как правило, различные материалы предоставляют выбор баланса между определенными прочностными и температурными характеристиками.

Пластик, который выходит из экструдера, имеет температуру в интервале 190–240 °С. Поскольку пластик горячий, он мягкий и ему легко придавать различные формы. Но когда он остывает, он быстро становится твердым, и форму его так просто уже не изменить. Необходимо добиться баланса между температурой и охлаждением так, чтобы пластик мог свободно течь через сопло, но быстро затвердевал, обеспечивая точные размеры распечатываемой 3D-детали.

Если такого баланса нет, могут возникнуть проблемы с качеством печати, когда, например, внешние размеры объекта окажутся не такими, как ожидалось. Как видно на рис.1, филамент, который был экструдирован на вершину пирамиды, не смог достаточно быстро застыть, чтобы сохранить форму.

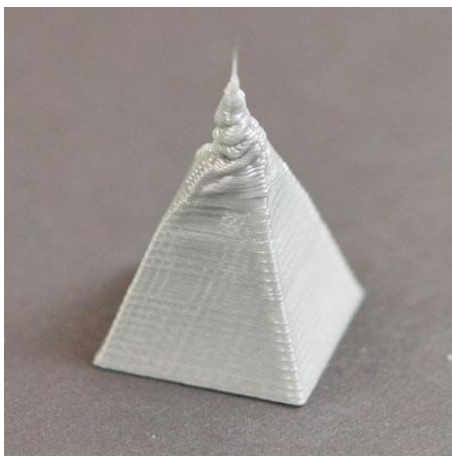


Рис. 2 – Вид детали при дефекте перегрева пластика

**Цель исследования.** Анализ тепловых процессов, протекающих в движущейся диэлектрической проволоке, исследование

зависимости температуры от теплофизических параметров материала, скорости движения диэлектрической проволоки.

**Исследование распределения теплового поля в движущейся диэлектрической проволоке.** Одним из методов решения этой задачи является применение метода, основанного на преобразовании Лапласа. Рассмотрим несколько наиболее характерных с теоретической точки зрения случаев.

Представим в общем виде диэлектрическую проволоку экструдера в виде области  $x > 0$  движущаяся со скоростью  $U$ . Начальная температура равна  $V_0 + ax$ , а область в  $x = 0$  при  $t > 0$  поддерживается при температуре  $V_1 + bx$ . При этом предполагаем, что в этой области тепло распределено равномерно, суммарной мощностью  $A_0$ .

При различных значениях постоянных  $V_0, V_1, a, b, A_0$  этот случай охватывает целый ряд практических задач. Найденные решения остаются справедливыми при обоих знаках скорости  $U$ . Дифференциальное уравнение, описывающее распределение температур в движущейся области имеет вид [2]

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{U}{\chi} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{\chi} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{A_0}{K}, \quad (1)$$

Задаемся граничными условиями

$$v = V_0 + ax, x > 0, t = 0; v = V_1 + bx, x = 0, t > 0 \quad (2)$$

Тогда дифференциальное уравнение распределения температур примет вид

$$\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} - \frac{U}{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{1}{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{A_0}{Kp} - \frac{V_0 + ax}{\chi} \quad (3)$$

Решая его при условии

$$\bar{v} = \frac{V_1}{p} + \frac{b}{p^2}, x = 0, \quad (4)$$

Получим зависимость температуры от влияющих факторов

$$\bar{v} = \left[ \frac{V_1 - V_0}{p} + \frac{b + aU - (\chi A_0 / K)}{p^2} \right] \exp \left\{ \frac{Ux}{2\chi} - x \left( \frac{U^2}{4\chi^2} + \frac{p}{\chi} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} + \left( \frac{\chi A_0}{K} - aU \right) \frac{1}{p^2} + \frac{V_0 + ax}{p}, \quad (5)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплообмена,  $K$  – коэффициент теплопроводности.

После преобразований и перехода к физическим переменным, получаем выражение в временной области

$$v = V_0 + ax + \left( \frac{\chi A_0 t}{K} \right) - aUt + \frac{1}{2} (V_1 - V_0) \left\{ \Phi \left[ \frac{x - Ut}{2(\chi t)^{\frac{1}{2}}} \right] + \frac{\bar{v}x}{\chi} \Phi \left[ \frac{x + Ut}{2(\chi t)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} + \frac{1}{2U} \left( b + aU - \frac{\chi A_0}{K} \right) \left\{ (x + Ut) \frac{\bar{v}x}{\chi} \Phi \left[ \frac{x + Ut}{2(\chi t)^{\frac{1}{2}}} \right] + (Ut - x) \Phi \left[ \frac{x - Ut}{2(\chi t)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – интеграл Лапласа,



$$\Phi = 1 - \Phi^*$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

Область  $x > 0$  с начальной температурой  $V_0$  движется со скоростью  $U$ . Граничное условие на плоскости  $x = 0$  имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial x} - kv = 0,$$

(7)

В этом случае нужно решить дифференциальное уравнение при  $A_0 = 0$  с соответствующим граничным условием. В этом случае решение исходного дифференциального уравнения, используя представление искомой функции в виде Лаплас-образа может быть записано следующим образом

$$\bar{v} = \frac{V_0}{p} - \frac{hV_0}{p \left\{ \left[ (p/\chi) + \left( \frac{U^2}{4\chi^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ h - \left( \frac{U}{2\chi} \right) \right] \right\}} \cdot \exp \left\{ \frac{Ux}{2\chi} - x \left( \frac{U^2}{4\chi^2} + \frac{p}{\chi} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (8)$$

где  $h$  – константа из граничного условия 3 рода.

Переходя к оригиналу [3], получим

$$v = V_0 - \frac{1}{2} V_0 \left\{ \Phi \left[ \frac{x - Ut}{2(\chi t)^{1/2}} \right] + \frac{\chi h}{\chi h - U} e^{ux/\chi} \Phi \left[ \frac{x + Ut}{2(\chi t)^{1/2}} \right] \right\} + \frac{V_0(2\chi h - U)}{2(\chi h - U)} \exp[hx - ht(U - \chi h)] \cdot \Phi \left[ \frac{x + (2\chi h - U)t}{2(\chi t)^{1/2}} \right], \quad (9)$$

Это решение справедливо при обоих знаках  $U$  и  $2\chi h - U$ . Учитывая возможность расплавленной диэлектрической проволоки на выходе экструдера к радиальному движению, предположим, что при установившемся радиальном течении расплавленной диэлектрической проволоки через каждую окружность в 1 сек проходит масса жидкого пластика  $m$ .

Тогда радиальная скорость жидкого пластика  $u_r$  равна

$$u_r = \frac{m}{2\pi\rho r}, \quad (10)$$

Переходя к цилиндрической системе координат дифференциальное уравнение теплопроводности принимает вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{u_r}{\chi} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{\chi} \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad (11)$$

где  $u_r$  – определяется равенством (10).

Вспомогательное уравнение для (11) при нулевой начальной температуре запишется следующим образом

$$\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} (1 - 2v) \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} - q^2 \bar{v} = 0, \quad (12)$$

где  $v = m/4\pi\chi\rho$ . Решение этого уравнения, ограниченное при  $r \rightarrow \infty$ , имеет вид

$$r^v K_v(qr), \quad (13)$$

отсюда изображение функции равняется

$$\frac{Q(qr)^v}{2^{v+1}\pi\chi\Gamma(v+1)} K_v(qr), \quad (14)$$

Имеет вид

$$\frac{Q}{4\pi\chi\Gamma(v+1)} \left( \frac{r^2}{4\chi t} \right)^v e^{-r^2/4\chi t}, \quad (15)$$

Решение (15) обладает тем свойством, что полное количество тепла в области  $r > 0$  постоянно и равно  $Q$ . Таким образом, оно аналогично решению для линейного источника применительно к данному случаю радиального движения среды.

Последняя формула предоставляет возможность проанализировать влияние радиуса сопла экструдера с необходимым количеством тепла для поддержания требуемой температуры.

**Результаты моделирования.** Используя результаты теоретического анализа, было проведено моделирование влияния внешних факторов на тепловые параметры движущейся диэлектрической проволоки. В качестве примера были выбраны наиболее распространенные пластики ABS и PLA, основные теплофизические параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные теплофизические параметры для пластика ABS

Вид пластика	Коеф.теплопроводности, Вт/(м <sup>2</sup> с)	Теплоемкость, Дж/(кг град)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
ABS	0,13–0,2	1300–2300	1030–1060	220
PLA	0,13	1800	1230–1250	173-178

Коэффициент теплообмена рассчитывается по формуле [1]

$$\chi = \frac{C}{c \cdot \rho}, \quad (16)$$

где  $C$  – коэффициент теплоемкости,

$\rho$  – плотность и составляет  $0.15 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup> град для ABS пластика.

В качестве примера проведем теплофизический расчет изменения температуры диэлектрической проволоки на выходе экструдера при скорости ее движения 1 м/с. Результаты расчета, проведенные с помощью MathCad, для пластиков типа ABS и PLA приведены на рис. 3.

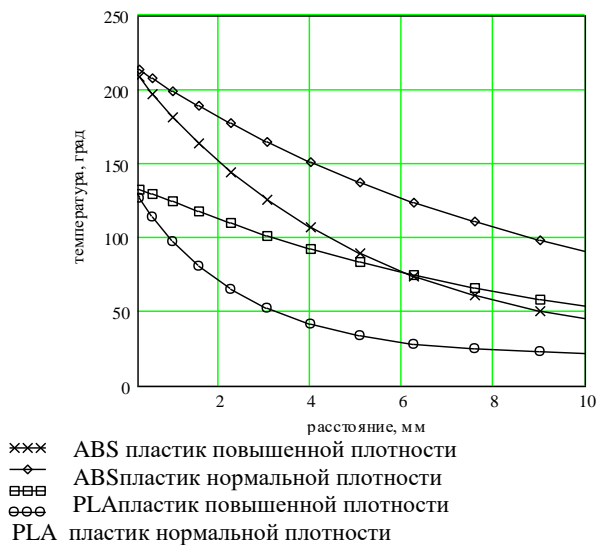


Рис. 3 – Зависимость температуры от координаты

Результаты расчета показывают, что при выбранных граничных условиях в направлении диаметра отверстия при сдвиге от центра по радиусу на 1 мм температура ABS пластика изменяется в пределах 20%, а для альтернативного PLA пластика на 30%.

Результаты проведенного моделирования говорят о том, что температура диэлектрической проволоки зависит от предельных значений плотности, теплоемкости и теплопроводности, используемых пластиков.

Кроме координаты и теплофизических параметров температура диэлектрической проволоки зависит от поступательной и радиальной скоростей ее

движения. Количественной мерой этого влияния является расхождение между графиками кривых.

Полученные результаты могут быть применены для решения дальнейших оптимизационных задач по улучшению качества печати FDM 3D-принтеров

**Выводы.** Математической моделью диэлектрической проволоки для 3D принтера на выходе экструдера является уравнение теплопроводности. В цилиндрических координатах его решения представляется с помощью функций Бесселя. Для его решения хорошо зарекомендовало себя преобразование Лапласа. Анализ полученных решений позволил определить характер зависимости распределения температура как в области сечения, так и по длине проволоки от теплофизических параметров и скорости. Перспективы улучшения качества 3D печати связаны с учетом в геометрии сопла экструдера и регулировании скорости движения диэлектрической проволоки.

#### Список литературы

1. Классификация 3D принтеров (7 технологий 3D печати) [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://geektimes.ru/post/208906/> – 19.12.2018 – Загл. с экрана.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. – Наука, 1964. – 488 с.
3. Мышкис, А. Прикладная математика для инженеров. специальные курсы. Litres, 2018. – 690 с.

#### References(transliterated)

1. Klassifikatsiya 3D printerov (7 tekhnologiy 3D pechati) [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupu: <https://geektimes.ru/post/208906/> – 19.12.2018 – Zagl. s ekrana.
2. Karslou G., Yeger D. Teploprovodnost' tverdykh tel: per. s angl. [Thermal conductivity of solids] – Nauka, 1964. – 488 p.
3. Myshkis, A. Prikladnaya matematika dlya inzhenerov. Spetsial'nyye kursy [Applied mathematics for engineers. Special courses]. Litres, 2018. – 690 p.

Поступила (received) 01.11.19

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Хорошайло Юрій Євгенійович (Хорошайло Юрий Евгеньевич Horoshajlo Yuriy Evgenievich)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри ПЕЕА, м.Харків, 057-70-21-494, e-mail: d\_doed@nure.ua

**Зайченко Наталія Ярославівна (Зайченко Наталия Ярославовна, Zaichenko Nataliia Yaroslavivna)** – аспірант кафедри ПЕЕА, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри ПЕЕА, м.Харків, Україна, e-mail: nataliia.zaichenko @ nure.ua

**Меняйло Олександр Дмитрович (Меняйло Александр Дмитриевич, Meniaylo Oleksandr Dmitrovych,)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент, м.Харків, 057-70-21-494, e-mail: d\_doed@nure.ua

**Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, И. Н. ЯРМАК, А. Д. МЕНЯЙЛО, А. В. СОВА, В. А. СВЕТИЧНЫЙ,  
И. К. СЕЗОНОВА**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОНЯТИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Предлагается устройство для измерения цветовых характеристик, которое с помощью измерительного преобразователя каждому излучению ставит в соответствие три сигнала, пропорциональных цветовых координат. Существующие устройства имеют очень много недостатков, среди которых малое быстродействие, вследствие использования инертных элементов, что делает невозможным измерения быстроизменяющихся световых потоков. В данном устройстве авторы попытались минимизировать недостатки. Также в данной статье предлагается математическая модель устройства. Уделено внимание психофизиологическому восприятию цвета.

**Ключевые слова:** измерение, устройство, цвет, фотодиоды, микроконтроллер, математическая модель, психофизиология зрения.

**Ю. Є. ХОРОШАЙЛО, І. М. ЯРМАК, О. Д. МЕНЯЙЛО, А. В. СОВА, В. А. СВІТЛИЧНИЙ,  
І. К. СЕЗОНОВА**

### **ВИКОРИСТАННЯ ПОНЯТТЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОЇ ФУНКЦІЇ В ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

Пропонується пристрій для вимірювання кольорних характеристик, яке за допомогою вимірювального перетворювача кожному випромінюванню ставить у відповідність три сигнали, пропорційних кольорних координат. Існуючі пристрої мають дуже багато недоліків, серед яких мала швидкість, в наслідок використання інертних елементів, що робить неможливим вимірювання швидкозмінних світлових потоків. У цьому пристрої автори спробували мінімізувати недоліки. Також в даній статті пропонується математична модель пристрою і приділено увагу психофізіологічному сприйняттю кольору.

**Ключові слова:** вимірювання, пристрій, колір, фотодиоди, мікроконтролер, математична модель, психофізіологія зору.

**Y. E. HOROSHAYLO, I. N. YARMAK, O. D. MENIAYLO, A. V. SOVA, V. A. SVETLICHNIY,  
I. K. SEZONOVA**

### **APPLICATION OF THE CONCEPT OF COLORIMETRIC FUNCTIONS IN APPLIED RESEARCH**

In this paper, the authors propose a device for measuring the color characteristics of light reflected or transmitted through an optical medium. The main element of this device is the measuring transducer, which assigns to each radiation three signals proportional to the color coordinates. Existing devices have many drawbacks, among which low speed, due to the use of inert elements, which makes it impossible to measure rapidly changing light fluxes. In this device, the authors tried to minimize these limitations by using photodiodes and a microcontroller with a built-in ADC and other devices. Also in this article, a mathematical model of the device is proposed. Attention is paid to psychophysiological perception of color. As a result, we found a device that has a number of advantages over its counterparts, which makes it possible to perform color measurement with higher accuracy. The aim of the work is to study the concept of colorimetric functions in applied research, it is very well shown how to use the colorimeter functions, in which studies, and in which areas. Also, the calculations of the optoelectronic colorimeter by the method of numerical experiment and the development of practical recommendations for improving the parameters are considered. The work has developed an optoelectronic colorimeter superior to analogues in the following parameters: measurement accuracy, ease of use, range for determining colors, simplicity of the device design, reliability, cost. Color measurement is necessary in various fields, for example, for color measurements, control and color management in industrial automation, household appliances, textile industry, service stations, printing, medicine, etc.

**Keywords:** measurement, device, color, photodiodes, microcontroller, mathematical model, psychophysiology of sight.

**Введение.** В последние годы, в связи с развитием цветного телевидения, мультимедийных программ для компьютеров, анимационных разработок, различных учебных программ и тренажеров существенно вырос интерес к средствам измерения цвета.

Приборы для измерения цвета применяются уже не одно десятилетие. Постепенно они завоевывают свое место и в повседневной практике. Прогресс в этой области зависит от разработки и производства новых аппаратов и методов измерения цвета с широкими операционными возможностями, недорогих и удобных в эксплуатации.

Одним из наиболее распространенных средств измерения цвета, применяемые в перечисленных выше областях, является электронный колориметр, так как он обладает следующими преимуществами – возможность экспресс контроля, простота в эксплуатации, высокая вероятность (точность) измерения. Возможности электронного колориметра значительно превосходят аналогичные параметры других приборов для измерения цвета.

Таким образом, дальнейшее изучение механизмов работы электронного колориметра, особенностей его применения, является актуальным и представляет значительный интерес, как для разработчиков этого типа устройств, так и для потребителей.

Вместе с тем нельзя не признать, и это постоянно отмечается исследователями, разработка средств и методов измерения цвета находится пока в стадии становления. Не вызывает сомнений необходимость расширения круга задач и ситуаций, как с точки зрения практических нужд, так и с целью накопления теоретического опыта.

Видение окружающего мира осуществляется в процессе зрительных ощущений и зрительного восприятия. В отличие от зрительного восприятия зрительные ощущения отражают лишь отдельные свойства предметов и явлений. Зрительное восприятие – это целостное отражение предметов и явлений, т.е. в совокупности их свойств, возникающее

при непосредственном воздействии физических раздражителей на рецепторные поверхности глаза. Оно представляет собой сложную деятельность зрительной анализаторной системы, включающую обработку визуальной информации (обнаружение объекта, различение и выделение его информативных признаков и воссоединение их в целостный зрительный образ), ее оценку (соотнесение воспринятого образа с перцептивными и вербальными эталонами), интерпретацию и категоризацию (принятие решения о классе, к которому относится объект) [1].

Развитие зрительного восприятия зависит от того, насколько слаженно и правильно функционируют его различные компоненты – зрительные ощущения или зрительные функции. Зрительные функции, будучи тесно связанными друг с другом, в психической деятельности образуют единое целое, именуемое актом зрения. Его физиологическая основа состоит в следующем: лучи света проходят через роговую оболочку глаза, хрусталик, стекловидное тело и достигают сетчатки. Роговая оболочка и хрусталик не только пропускают свет, но и преломляют его лучи, действуя как двояковыпуклая линза. Это позволяет собирать их в сходящийся пучок и направлять на сетчатку так, что на ней получается действительное, но инвертированное (перевернутое) изображение предметов. В колбочках и палочках, располагающихся в сетчатке, световая энергия преобразуется в нервные импульсы, которые проводятся по зрительным нервам в зрительные центры головного мозга. Здесь происходит превращение энергии нервного импульса в зрительное ощущение. В результате возникают ощущения формы, величины, цвета предметов, степени их удаленности от глаза и т.п. Функциональная способность сетчатки неравноценна на всем ее протяжении. Наиболее высока она в ее центральной части (центральная ямка желтого пятна), где сетчатка состоит из высоко дифференцированных рецепторов – колбочек. При рассматривании любого предмета глаз устанавливается таким образом, что изображение предмета всегда проецируется на область центральной ямки [2]. На остальной части сетчатки преобладают менее дифференцированные рецепторы – палочки: и чем дальше от центра проецируется изображение предмета, тем менее отчетливо оно воспринимается.

Зрение имеет двойственную природу: дневное зрение осуществляется колбочками, а ночное – палочками. Палочковый аппарат обладает высокой светочувствительностью, но не способен передавать ощущение цветности; колбочки обеспечивают форменное и цветовое зрение, но по сравнению с палочками заметно менее чувствительны к слабому свету и полностью функционируют только при хорошем освещении. В зависимости от степени освещенности можно выделить три разновидности функциональной способности глаза.

1. Дневное (фотопическое) зрение осуществляется колбочковым аппаратом глаза при большой интенсивности освещения. Оно характеризуется высокой остротой зрения и четким, адекватным восприятием цвета.

2. Сумеречное (мезопическое) зрение осуществляется палочковым аппаратом глаза при слабой степени освещенности (0,1–0,3 лк). Оно характеризуется низкой остротой зрения и ахроматическим (нецветным) восприятием предметов. Отсутствие цветоощущения при слабом освещении хорошо отражено в пословице «ночью все кошки серы».

3. Ночное (скотопическое) зрение также осуществляется палочками при очень низкой освещенности и сводится только к ощущению света.

Таким образом, двойственная природа зрения требует дифференцированного подхода к оценке зрительных функций. Следует различать центральное и периферическое зрение.

Центральное зрение характеризуется способностью человека различать форму, мелкие детали и цвет рассматриваемых предметов. Для распознавания предметов внешнего мира необходимо различать в них отдельные детали. Чем мельче детали различаемые глазом, тем выше его острота зрения. Под остротой зрения принято понимать способность человеческого глаза воспринимать раздельно точки, расположенные на минимальном расстоянии друг от друга. В связи с неравноценным распределением колбочек в сетчатке различные ее участки неравномерны по остроте зрения: по мере удаления от центра сетчатки острота зрения падает. Уже на расстоянии  $10^\circ$  от центра она равна 0,2 и еще более снижается к периферии. Нормальная острота зрения у большинства взрослых людей соответствует 1.

Максимальная спектральная чувствительность колбочек так называемого «стандартного наблюдателя» составляет 565 нм для красных колбочек, 540 нм для зеленых колбочек и 440 нм для синих колбочек, хотя по этому вопросу есть разногласия у разных авторов и у наблюдаемых индивидов. Необходимо отметить, что чувствительность палочек достигает максимума при 495 нм – прямо посередине между синими и зелеными колбами.

К хроматическим цветам относятся все тона и оттенки цветного спектра. Они характеризуются тремя качествами: 1) цветовым тоном (особенность цвета отличаться от других цветов спектра: синий, красный, желтый и др.); 2) насыщенностью, определяемой долей основного тона и примесей к нему серого, что определяет интенсивность цвета; 3) яркостью или светлотой цвета, степенью близости его к белому (светлые и более темные цвета). Различные комбинации этих характеристик дают множество оттенков хроматического цвета [3]. Человек в состоянии воспринимать около 180 цветовых тонов, а с учетом различий в яркости и насыщенности – более 13 тысяч.

Периферическое зрение играет большую роль в жизни человека: оно служит для ориентировки в пространстве, обладает высокой чувствительностью по отношению к движущимся объектам, обслуживает человека в условиях пониженного освещения. Обеспечиваемое периферическими отделами сетчатки периферическое зрение определяется величиной и конфигурацией поля зрения – пространства, которое воспринимается глазом (или глазами) при неподвижном взоре. Для ахроматических (не цветных) объектов нормальное поле зрения (при одновременном смотре обоими глазами) охватывает по горизонтали пространство в  $180^\circ$ , по вертикали – в  $110^\circ$ . Поле зрения каждого глаза имеет определенные границы: снаружи –  $90^\circ$ , книзу снаружи –  $90^\circ$ , книзу –  $60^\circ$ , книзу кнутри –  $50^\circ$ , кнутри –  $60^\circ$ , кверху кнутри –  $55^\circ$ , кверху –  $55^\circ$  и кверху снаружи –  $70^\circ$ . На обоих глазах границы поля зрения симметричны.

Биофизическая природа зрения основана на взаимодействии отдельных молекул (ретиноидов) с излучением. Эти молекулы являются производными ретинола (витамин А1), который отвечает за желто-оранжевую окраску сетчатки.

В палочках есть всего лишь один вид ретиноидов – родопсин, а в колбочках содержатся многие виды. В целом насчитывается более двенадцати различных видов, но из них выделяются четыре, особенно заметные в колбочках [4]. Это родопсином 5, 7 и 9 а также вещество, чувствительна к ультрафиолетовым волн – родопсин 11. Однако нужно отметить, что роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело поглощают большую часть ультрафиолетового излучения (УФ). Красные, зеленые и синие колбочки содержат смесь всех этих ретиноидов, но в каждом виде колб в большем количестве присутствует один вид ретиноидов, причем в пропорции в 1000 раз больше, чем все остальные.

В клетках колбочек и палочек есть тысячи мембранных дисков, образованных плазматическими складками и на которых 15 прикреплены длинными цепочками молекулы ретиноидов. Таким образом, образуется настоящее фрактальное пространство для улавливания света.

С точки зрения физики все рассмотренные молекулы похожи. Они состоят из семи длинных цепочек опсина окружающую небольшую, но особую молекулу – 11-цис-ретиноаль. Когда фотон сталкивается с такой молекулой, есть 50% -ная вероятность, что она (молекула) «развернется» и превратится в изомер – транс-ретиноаль.

В темноте 11-цис-ретиноаль прочно связан с белком опсин. Интересы фотона приводит к изомеризации 11-цис-ретиноаль в транс-ретиноаль. При этом комплекс опсин-транс-ретиноаль через несколько химических превращений достаточно быстро диссоциирует на опсин и транс-ретиноаль. Регенерация родопсина зависит от взаимодействия клеток пигментного эпителия и светочувствительных клеток. В случае ослепления родопсин

восстанавливается с зрительного пурпура, то есть с ретиноидов пигментного эпителия.

Это явление создает основу нервной информации. В темноте во внешних сегментах светочувствительных клеток протекает постоянный входной «темновой» ток [5]. В результате постоянный мембранный потенциал светочувствительных клеток составляет примерно – 40 мВ. Входной ток в темноте переносится в основном ионами натрия, 16 следующими вдоль электрохимического градиента через катионные каналы внешнего сегмента светочувствительных клеток. Под действием света катионные каналы закрываются. Таким образом, значение мембранного потенциала смещается к значению равновесного калиевого потенциала, составляет примерно – 80 мВ. Соответственно, возникают условия для появления и трансляции зрительного сигнала по аксонам нервных клеток.

**Основная часть.** В данной работе авторами предлагается устройство для измерения цветовых характеристик отражаемого или прошедшего через оптическую среду светового излучения [6].

Основным элементом данного устройства является измерительный преобразователь, который каждому излучению ставит в соответствие три сигнала, пропорциональных цветовых координатам.

Существующие устройства для измерения цветовых характеристик имеют ряд недостатков – малое быстродействие, вследствие использования инертных элементов, что даст невозможным измерение быстроизменяющихся световых потоков; недостаточная точность измерения светового потока, который имеет слабую мощность (слабоосвещенные объекты) вследствие низкой чувствительности фоторезисторов, невозможность разделения в пространстве измерительного преобразователя и устройства; невозможность непосредственного управления устройством вследствие осуществления органов управления и т.д.

В разработанном устройстве для измерения цветовых характеристик объектов, авторы попытались минимизировать вышеперечисленные недостатки за счет использования фотодиодов и микроконтроллера со встроенным АЦП, светодиодов эталонного освещения и метода измерения цвета, который состоит в определении интенсивности трех составных частей входного светового потока преобразовании этих данных в цифровой сигнал для последующего пересчета сигнала координаты цвета  $x$  и  $y$  для диаграммы цвета, что позволит однозначно характеризовать цвет объекта, расширение функциональных возможностей за счет добавления интерфейса управления прибором средства отображения информации, возможности сохранения информации на картах памяти и возможности использования прибора в автономном режиме без задействования ПК [7]. Работает устройство следующим образом: в цифровое устройство измерения цвета, который содержит три светофильтры, три светочувствительные элементы, нормировочный усилитель, микроконтроллер,





$$\lambda = \frac{\begin{pmatrix} (U_1, U_1) & \dots & (U_n, U_1) & (k_j, U_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (U_1, U_n) & \dots & (U_n, U_n) & (k_j, U_n) \\ (k_j, U_1) & \dots & (k_j, U_n) & (k_j, k_j) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (U_1, U_1) & \dots & (U_n, U_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ (U_1, U_n) & \dots & (U_n, U_n) \end{pmatrix}} \quad (10)$$

**Вывод.** Полученные результаты подтверждают, что устройство разработанное авторами имеет ряд преимуществ перед своими аналогами, что позволяет осуществлять измерение цвета с более высокой точностью.

#### Список литературы

1. Богданович Л. Б., Бурьян В. А., Раутман Ф. И., *Художественное конструирование в машиностроении*. Киев: Техніка, 1976. 183 с.
2. Варламов Р. Г., Струков О. Д., *Элементы художественного конструирования и технической эстетики*. Москва: Советское радио, 1980. 96 с.
3. Лютов В. П., Четверкин П. А., Головастик Г. Ю., *Цветоведение и основы колориметрии : учебник и практикум для академического бакалавриата..* Москва: Юрайт, 2018. 222 с.
4. Браэм Г. *Психология цвета*. Москва: АСТ, Астрель, 2009. 158 с.
5. Мураховский В. И., Симонович С. В., *Большая книга цифровой фотографии*, Пемза: Питер, 2012. 304 с.
6. Чуркин А. В., Уварова Р. М., Шашлов А. Б., *Основы светотехники. Учебник* : Москва: МГУП, 2002. 310 с.
7. Шашлов Б. А. *Цвет и цветовоспроизведение*. Москва: МГАП, Мир книги 1995. 245 с.
8. Гуревич М. М., *Фотометрия (теория, методы, приборы)*. Ленинград: Энергоатомиздат 1983. 415 с.
9. Хорошайло Ю. Е., Семенов С. Г., Лимаренко В. В. Пат 107317, Украина, Цифровой датчик для измерения цвета. 2016.
10. Khoroshaylo E. Y., Sezonova I. K., *Colorimetry. Proceeding of COAL 2005 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers V2*. Yalta, 2005. 254p.

#### References (transliterated)

1. Bogdanovich L. B., Burian V.A., Rautman F.I. *Hudozhestvennoe konstruirovaniye v mashinostroenii* [Artistic design in mechanical engineering]. Kiev, Tehnika Publ., 1976. 183 p.
2. Varlamov R. G., Strukov O. D. *Elementy hudozhestvennogo konstruirovaniya i tehnicheckoy estetiki* [Elements of artistic design and technical aesthetics]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1980. 96 p.
3. Lyutov V. P., Chetverkin P. A., Golovastikov G. Yu. *Tsvetovedeniye i osnovy kolorimetrii : uchebnyk i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Color science and bases of colorimetry: a textbook and a practical work for academic baccalaureate]. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 222 p.
4. Braham G. *Psihologiya tsveta* [Psychology of color]. Moscow, AST, Astrel, 2009. 158 p.
5. Murakhovsky V. I., Simonovich S. V. *Bolshaya kniga tsifrovoy fotografii* [The Big Book of Digital Photography]. Pemza, Peter Publ., 2012. 304 p.
6. Churkin A. V., Uvarova R. M., Shashlov A. B. *Osnovy svetotekhniki. Uchebnyk* [Fundamentals of lighting technology]. Moscow, MGUP Publ., 2002. 310 p.
7. Shashlov B. A. *Tsvet i tsvetovospriozvedeniye* [Color and color reproductions]. Moscow, MGAP, The World of the Book Publ., 1995. 245 p.
8. Gurevich M. M. *Fotometriya (teoriya, metody, pribory)* [Photometry (theory, methods, devices)]. Leningrad, Energoatomizdat 1983. 415 p.
9. Horoshajlo Yu. E., Semenov S. G., Limarenko V. V. Pat 107317, Ukraina. *Cifrovoy datchik dlya izmereniya cveta*. 2016.
10. Khoroshaylo E. Y., Sezonova I. K., *Colorimetry. Proceeding of COAL 2005 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers V2*. Yalta, 2005. 254 p.

*Поступила (received) 01.11.19*

#### *Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors*

**Хорошайло Юрий Евгениевич (Хорошайло Юрій Євгенійович, Horoshaylo Yuriy Evgeniyovich)** – кандидат технічних наук, професор, Харківський Національний університет радіоелектроніки; м. Харків, Україна

**Ярмак Иван Николаевич (Ярмак Іван Миколайович, Yarmak Ivan Mykolayovich)** – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

**Меняйло Александр Дмитриевич (Меняйло Олександр Дмитрович, Menyaylo Alexander Dmitrievich)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський Національний університет радіоелектроніки; м. Харків, Україна

**Сова Анна Васильевна (Сова Анна Василівна, Sova Anna Vasilevna)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Харківський Національний університет радіоелектроніки; м. Харків, Україна

**Светличный Виталий Анатольевич (Світличний Віталій Анатолійович, Svetlichny Vitaliy Anatolevich)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ; м. Харків, Україна

**Сезонова Ирина Константиновна (Сезонова Ірина Костянтинівна, Sezonova Irina Konstantinovna)** – кандидат технічних наук, професор,, Харківський Національний університет радіоелектроніки; м. Харків, Україна;



## ЗМІСТ

<b>Безьянный Ю. Г., Талько О. В., Тесленко Л. О.</b> Использование поверхностных акустических волн для выявления дефектов в пластинах с покрытием.....	3
<b>Безьянный Ю. Г., Висоцький А. М., Колесников А. М., Комаров К. А., Назаренко В. А., Солнцев В. П.</b> Особливості ультразвукового контролю за зміною властивостей зразків матеріалу до і після прокатки.....	7
<b>Бурма М. Г., Рой В. Ф., Грініна В. О.</b> Експериментальна установка для дослідження електронних властивостей провідників.....	11
<b>Головкіна Л. В., Зайченко О. Б.</b> Розподіл обчислювальних ресурсів в модульній авіоніці.....	17
<b>Невлюдов І. Ш., Письменецький В. О., Григор'єва О. В., Сікало О. С., Сук Д. О.</b> Трекерна система стеження за Сонцем.....	21
<b>Плеснецов Ю. А.</b> Экспериментальные исследования скоростного режима профилирования.....	28
<b>Слободчук А. Ю., Позняков В. О., Ноздрачова К. Л., Юданова Н. М., Якіменко В. О.</b> Застосування систем контролю доступу та розробка макету приладу на основі RFID технології.....	35
<b>Смолін Ю. О.</b> Електронна система діагностики показників газообміну в дизелі та результати експериментальних досліджень.....	48
<b>Стороженко В. А., Орел Р. П., Мешков С. Н.</b> Тепловизионная диагностика тепловой защиты зданий и сооружений.....	56
<b>Суворова М. Д.</b> Розробка намагнічувальних джерел для ЕМА перетворювачів на основі потужних постійних магнітів.....	63
<b>Хорошайло Ю. Е., Зайченко Н. Я., Меньяло А. Д.</b> Анализ теплофизических характеристик диэлектрических проволок, применяемых в 3D принтерах .....	74
<b>Хорошайло Ю. Е., Ярмак И. Н., Меньяло А. Д., Сова А. В., Светличный В. А., Сезонова И. К.</b> Использование понятия колориметрической функции в прикладных исследованиях.....	78

## CONTENT

<b>Bezimyanniy Yu. G., Talko O. V., Teslenko L. O.</b> The use of surface acoustic waves for defect detection in coated plates.....	3
<b>Bezimyanniy Yu. G., Vysotsky A. M., Kolesnikov A. M., Komarov K. A., Nazarenko V. A., Solntsev V. P.</b> Peculiarities of ultrasonic inspection on the changes in the properties of sample material before and after rolling...	7
<b>Burma N. G., Roy V. F., Grinina V. O.</b> Experimental installation for research of electron properties of conductors.....	11
<b>Golovkina L.V., Zaichenko O.B.</b> Modular avionics computing resources distribution.....	17
<b>Nevlyudov I., Pismenetsky V., Grigorieva O., Sikalo O., Suk D.</b> Tracking system for tracking the Sun.....	21
<b>Plesnetsov Yu.A.</b> Experimental researches of speed profiling mode.....	28
<b>Slobodchuk A. Yu., Poznyakov V. O., Nozdrachova K. L., Yudanova N.M., Yakimenko V.O.</b> Application Of Access Control Systems And Development Of Device Model Based On Rfid Technology.....	35
<b>Smolin Yu. O.</b> Electronic diagnostic system for gas exchange in diesel and experimental research results.....	48
<b>Storozhenko V.A., Orel R. P., Meshkov S. N.</b> Thermographic examination of buildings and constructions thermal protection.....	56
<b>Suvorova M.D.</b> Development of magnetic sources for emo converters on the basis of powerful permanent magnets.....	63
<b>Horoshailo Ye., Zaychenko N., Menyalo A.</b> Dielectric wire for 3D printer termophysical characteristics analysis.....	74
<b>Horoshaylo Y. E., Yarmak I. N., Meniaylo O. D., Sova A. B., Svetlichniy V. A., Sezonova I. K.</b> Application of the concept of colorimetric functions in applied research.....	78

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».  
СЕРІЯ: ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ТА ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА**

*Збірник наукових праць*

*№ 1'2019*

Науковий редактор: Г. М. Сучков, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна

Відповідальні секретарі:

О. С. Курандо, інженер 1 кат., НТУ «ХП», Україна

І. Г. Хорошайло, інженер 1 кат., Україна, НТУ «ХП», Україна

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики»  
Тел.: (057) 707-63-80; e-mail: vestnikhpi@gmail.com

Підп. до друку 29.12.2019 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,2. Облік.-вид. арк. 9,1.  
Тираж 100 пр. Зам. № 25. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Видавництво та друк ФО-П Єфименко С.А.  
61166, Україна, м. Харків, вул. Коломенська, 27  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і  
розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 6869 від 08.08.2019 р.