

Вимірюйте
усе доступне вимірюванню
й робіть недоступне вимірюванню
доступним.

Галілео Галілей

Метрологія



Та прилади

№ 6(56), 2015

Науково-виробничий журнал

Засновники:

Академія метрології України,
Харківський національний
університет радіоелектроніки (ХНУРЕ),
ТОВ виробничо-комерційна
фірма «Фавор ЛТД»

Видається з березня 2006 року
Рік випуску десятий
Передплатний індекс 92386

Редакційна колегія:

Большаков В. Б., д. т. н., с. н. с.
Варша З., д. т. н., Польща
Величко О. М., д. т. н., проф.
Віткін Л. М., д. т. н., проф.
Володарський Є. Т., д. т. н., проф.
Гінзбург М. Д., д. т. н., проф.
Грищенко Т. Г., д. т. н., с. н. с.
Гудрун В., д. т. н., Німеччина
Домницький Р. А.
Жагора М. А., д. т. н., проф., Білорусь
Захаров І. П., д. т. н., проф.
Зенкін А. С., д. т. н., проф.
Коломієць Л. В., д. т. н., проф.
Косач Н. І., д. т. н., с. н. с.
Кошева Л. О., д. т. н., проф.
Крюков О. М., д. т. н., проф.
Кузьменко Ю. В.
Мачехін Ю. П., д. т. н., проф.
Назаренко Л. А., д. т. н., проф.
Неєжмаков П. І., д. т. н. доц.
Петришин І. С., д. т. н., проф.
Пістун С. П., д. т. н., проф.
Радев Х., д. т. н., проф., Болгарія
Рожнов М. С., к. х. н., с. н. с.
Руженцев І. В., д. т. н., проф.
Скубіс Т., д. т. н., проф., Польща
Столярчук П. Г., д. т. н., проф.
Сурду М. М., д. т. н., проф.
Туз Ю. М., д. т. н., проф.
Хакімов О., д. т. н., проф., Узбекистан
Чалий В. П., к. т. н., с. н. с.
Черепков С. Т., к. т. н. доц.
Чуновкіна А. Г., д. т. н., Росія

Редакційна група:

Головний редактор Фісун В. П.
Науковий редактор — відповідальний
секретар Винокуров Л. І.
Дизайнер-верстальник Зайцев Ю. О.

Журнал **рекомендовано до друку**
вченою радою ХНУРЕ
(протокол №8 від 26.11.2015)

Адреса редакції:

61002, Харків, вул. Мирососицька, 40;
Тел.: (057) 700-46-81, (095) 00-68-665
E-mail: metrolog-prylady@ukr.net
mp@metrology.kharkov.ua
<http://www.metprilady.com/>
<http://www.amu.in.ua/journal1>

Видавець та виготовлювач:

ВКФ «Фавор ЛТД»
61140, Харків, пр-т. Гагаріна, 94-А, кв. 35;
Свідоцтво про внесення
до Держреєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції
серія ХК № 90 від 17.12.2003.

Підписано до друку 06.01.2016.
Формат 60x84/8. Папір крейдований.
Ум. друк. арк. 8,43. Обл.-вид. арк. 7,13.
Друк офсетний. Тираж 500 прим.
Замовлення № 31.

© «Метрологія та прилади», 2015

Журнал зареєстровано
у Державній реєстраційній
службі України, свідоцтво серія
КВ № 20033-8933ПР від 17.05.2013;
включено до Переліку наукових
фахових видань України, наказ
Міністерства освіти і науки України
№ 747 від 13.07.2015

Журнал включено до Міжнародної
наукометричної бази даних
Index Copernicus, лист від 08.03.2013

Кабінет Міністрів ухвалив фінальний пакет документів, необхідних для завершення першого етапу реформи системи технічного регулювання. Головним завданням першого етапу було законодавче забезпечення переходу на європейські стандарти й процедури. Завдання нового етапу реформи — зняти зайві бар'єри для доступу українських промислових товарів на ринки ЄС.

До фінального пакету документів увійшли технічні регламенти та засоби виміральної техніки, модулі оцінки відповідності, а також план заходів щодо оптимізації мережі державних лабораторій. Однак загальний об'єм документації, затвердженої на першому етапі реформи, був набагато більшим. Так, було прийнято 24 постанови і видано 7 наказів Мінекономрозвитку. Із 27 актів європейського секторального законодавства, визначених Угодою про асоціацію, в Україні прийнято 24 технічних регламенти, з яких 21 вже є обов'язковим до застосування. Загалом в Україні прийнято 47 технічних регламентів, 45 з яких розроблено на основі актів законодавства ЄС, 41 технічний регламент вже є обов'язковим до застосування.

Ухвалення всіх цих документів було необхідною умовою для реалізації ключових законів реформи системи технічного регулювання. Йдеться про закони: «Про метрологію та метрологічну діяльність», «Про технічні регламенти та оцінку відповідності», «Про стандартизацію», ухвалені протягом 2014-2015 років.

Величезна підготовча робота, проведена у 2014-15 роках, стала основою для наступного етапу реформи. Головне завдання нового етапу — підписання Угод про оцінку відповідності та прийнятність промислових товарів (Agreements on Conformity Assessment and Acceptance of Industrial Goods, ASAG). Підписання Угод ASAG означатиме, що торгівля товарами між ЄС та Україною проводитиметься на тих самих умовах, які застосовуються у торгівлі між країнами-членами ЄС. Окрім того, триватиме затвердження технічних регламентів і налаштування ринкового нагляду, який є одним із ключових елементів нової системи технічного регулювання.

«ЄС має економічне і стратегічне значення для українських виробників. Новими можливостями, які відкриває для них Угода про асоціацію, треба правильно скористатися. А для цього ми реформуємо нашу застарілу систему стандартизації та приводимо її у відповідність до європейської. Це зніме всі штучні бар'єри щодо торгівлі з ЄС», — підкреслив Міністр економічного розвитку і торгівлі України Айварас Абромавичус.

Зі свого боку заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України Максим Нефьодов зазначив, що сьогодні завершується величезний етап реформування системи технічного регулювання. Протягом цього етапу Мінекономрозвитку створило засади для переходу від неефективної і застарілої радянської системи контролю безпечності промислової продукції до сучасної європейської системи. «Європейська система ідеологічно відрізняється від пострадянської. Стара система базувалася на обов'язкових стандартах, ГОСТах, які регулювали абсолютно всі характеристики товару чи послуги. Відповідно, дотримання цих ГОСТів контролювалося шляхом аналізу окремих одиниць товару, які надавали самі виробники. Звісно, такий підхід не давав гарантію, що решта одиниць товару з цієї партії також відповідають ГОСТу», — розповів Максим Нефьодов.

Європейська система, навпаки, надає більше свободи виробнику — він мусить дотримуватися лише загальних вимог щодо безпеки (саме вони й закріплені в технічних регламентах), а характеристики товару виробник може обирати на власний розсуд. При цьому контроль за безпекою товарів в європейській системі здійснюється через ринковий нагляд. «Це схоже на метод «таємного покупця» — проводиться контрольна закупка товару в торговельній мережі, і якщо товар не відповідає вимогам безпеки — з продажу вилучається вся партія. Такий спосіб контролю більш ефективний, що підтверджено багаторічним успішним досвідом США і країн ЄС», — додав заступник міністра.

Окрім затвердження низки технічних регламентів, перший етап реформи системи технічного регулювання містить скасування обов'язкового використання ГОСТів. У 2015 році скасовано дію понад 15 773 ГОСТів, розроблених до 1992 року. Цей крок звільняє підприємництво ініціативу і сприяє розвитку конкуренції, а отже створенню нових, інноваційних товарів та послуг.

Окрім того, Національне агентство з акредитації України отримало визнання з боку Європейської кооперації з акредитації за всіма напрямками акредитації (випробувальні та калібрувальні лабораторії, органи зі сертифікації, а також органи з інспектування). Це дозволить розбудувати в Україні ефективну систему сертифікації та ринкового нагляду.

Наступним кроком реформи стане реалізація Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року, у тому числі підписання Угоди ASAG щодо продукції стосовно кожного технічного регламенту. З підписанням Угоди ASAG українські виробники зможуть вільно постачати свою продукцію без проходження додаткової сертифікації в країнах ЄС. Це знімає бар'єри для українських експортерів і дозволить вільний обіг промислових товарів на території країн ЄС.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ

Володарский Е., Кошевая Л., Варша З.

Метод уменьшения неопределенности
принятия решения при измерительном контроле.
Часть 2. Коррекция уставок выходной величины

3

MEASURING CONTROL

Volodarsky E., Kosheva L., Warsza Z.

The Method of Reducing Uncertainty
of Decision-Making in the Measuring Control.
Part 2. Correction of Setpoints the Output Quantity.

ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОВІРКА

Тимофеев Е.

Забезпечення дозиметричного контролю
лазерного випромінювання

8

MEASUREMENT AND VERIFICATION

Tymofeev Y.

Providing of Laser Radiation
Dosimetric Monitoring

ТОЧНІСТЬ ТА ДОСТОВІРІСТЬ

Квасніков В., Ганєва Т.

Шляхи підвищення точності вимірювання
деформації та механічних напружень

15

ACCURACY AND RELIABILITY

Kvasnikov V., Ganyeva T.

Ways to Improve Measurement Accuracy
Strain and Mechanical Stress

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ

Левикін В., Чала О.

Оцінювання часових характеристик подій
дискретних процесів у відповідності
до концепції GUM

19

METHODS AND PROCEDURES

Levykin V., Chala O.

Evaluation of the Temporal Characteristics
of Discrete Processes
Using the GUM Concept

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК

Зенкін А., Лісовець С., Здоренко В.

Акустичний контроль конструкційних
матеріалів з використанням
амплітудно-залежного внутрішнього тертя

24

PARAMETERS AND CHARACTERISTICS CONTROL

Zenkin A., Lisovets S., Zdorenko V.

Acoustic Control of Construction
Materials Using Amplitude-Dependent
Internal Friction

НОРМАТИВНА БАЗА

Косач Н., Большаков В.

Упровадження в Україні стандартів ISO 7066-1
та ISO 7066-2 з оцінювання невизначеності
під час калібрування та застосування
приладів вимірювання витрати (частина 1)

28

NORMATIVE BASE

Kosach N., Bolshakov V.

Implementation in Ukraine Standards ISO 7066-1
and ISO 7066-2 Evaluation
of Uncertainty in Calibration
and Devices Flowmeter (Part 1)

ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ

Назаренко Л., Можаровська Т.

Системи дорожнього освітлення
з урахуванням приємкової фотометрії

34

APPLICATION AND EXPLOITATION

Nazarenko L., Mozharovska T.

The Road Lighting Systems Taking
Into Account Mesopic Photometry

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОНОСІВ

Петришин І., Присяжнюк Т., Бас О.

Дослідження енергетичної цінності
природного газу у споживачів
комунально-побутового сектору

42

ENERGY EFFICIENCY

Petryshyn I., Prysazhnyuk T., Bas O.

Research the Natural
Gas Energy Value to Domestic
Household Sector Consumers

НЕЛІНІЙНА МЕТРОЛОГІЯ

Мачехін Ю., Курський Ю.

Оцінка параметрів охолоджених часток
інструментами нелінійної метрології

50

NONLINEAR METROLOGY

Machekhin Yu., Kurskoy Yu.

The Evaluation of Cooled Particles' Parameters
by Instruments of Nonlinear Metrology

КВАЛІМЕТРІЯ

Мотало А., Мотало В., Стадник Б.

Аналіз і синтез кваліметричних шкал

54

QUALIMETRY

Motalo A., Motalo V., Stadnyk B.

Analysis and Synthesis of the Qualimetrical Scales

ХІМІЧНА МЕТРОЛОГІЯ

Калинюк М., Адеєва Л., Козін Р.

Особливості визначення вмісту водню
в мідних сплавах

63

CHEMICAL METROLOGY

Kalyniuk M., Adeeva L., Kozin R.

Peculiarity of the Determination Hydrogen Content
in Copper Alloys

ВІТАЄМО ЮВІЛЯРІВ

Тищенко Б.

До 50-річчя метрологічної служби
ННЦ «ХФТІ»

70

WELCOME

Тищенко Б.

To the 50th of Metrological Service of National
Scientific Centre «Khakiv Physics-Technical Institute»

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ

План набору слухачів на 2016 рік

72

TRAINING EXPERTS

State Enterprise for Year 2016

УДК 53.088.23

THE EVALUATION OF COOLED PARTICLES' PARAMETERS BY INSTRUMENTS OF NONLINEAR METROLOGY

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ОХОЛОДЖЕНИХ ЧАСТОК ІНСТРУМЕНТАМИ НЕЛІНІЙНОЇ МЕТРОЛОГІЇ

Yu. Machekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Physical Foundations of Electronic Engineering Department,
Yu. Kurskoy, Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Physical Foundations of Electronic Engineering Department, Kharkov National University of Radioelectronics, Kharkov

Ю. Мачехін, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичних основ електронної техніки,
Ю. Курський, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

In the article the task of laser Doppler cooling of particles (atoms, ions and molecules), which has important applications for physics and metrology, is considered. It is shown that the laser cooling is the interaction process between a deterministic system of laser radiation and a chaotic system of moving particles. For monitoring and estimation of the cooling particles' parameters it's proposed to use the methods and instruments of Nonlinear Metrology that were designed for measurement of nonlinear dynamic systems parameters. The formula for estimating of the laser radiation Shannon entropy, as a function of a laser frequency, is obtained. The results allow to evaluate the change of the entropy of the cooling particles system after a given number of cycles "absorption — spontaneous emission of photons", which opens the new possibility for control of laser cooling process and estimate of temperature with small discrete values.

У роботі розглянуто задачу лазерного доплерівського охолодження частинок (атомів, іонів і молекул), яка має важливе прикладне значення для фізики і метрології. Показано, що лазерне охолодження є процесом взаємодії детермінованої системи лазерного випромінювання з хаотичною системою рухомих частинок. Для оцінки параметрів охолоджених часток і контролю процесу охолодження запропоновано використовувати методи та інструменти нелінійної метрології, розроблені для вимірювання параметрів нелінійних динамічних систем. Отримано вираз для оцінки ентропії лазерного випромінювання, як функцію частоти. Результати роботи дають можливість оцінки зміни ентропії системи охолоджених часток після заданої кількості циклів «поглинання — спонтанне випромінювання фотонів», що відкриває можливість контролю процесу охолодження та оцінки температури з малими дискретними значеннями.

Keywords: laser cooling, Nonlinear Metrology, Shannon entropy.

Ключові слова: лазерне охолодження, нелінійна метрологія, ентропія Шеннона.

The Introduction

One of the outstanding tasks in physics of the last quarter of the XX century was the task of cooling of gaseous substances to absolute zero temperature by braking the Brownian motion of particles (atoms, ions, molecules) using a laser radiation. The successful implementation of the cooling and retention of particles is important for physics, metrology and electronics, The particles, cooled to stop the thermal motion, can be observed more longer than moving particles, that is important for the high-resolution spectroscopy and the stabilization of laser frequency. When the temperature of particles' ensemble becomes close to 0oK it's possible to obtain the superfluidity status and the Bose-Einstein condensate, which can be used to create the quantum memory. The development of the cooling technology and retain of the cooled particles opens the new opportunities for metrological science to improve standard base, allows to obtain new reference points of frequency standards and improves the accuracy of global navigation systems. The perspective metrological tasks include the creating of optical clocks based on cooled single ions in electromagnetic traps and atoms trapped in the optical grid. It is assumed that the relative uncertainty of such clock frequency reaches values in 10⁻¹⁷–10⁻¹⁸ [1].



Yu. Machekhin



Yu. Kurskoy

The laser cooling process bases on quantum-mechanical ideas about the absorption and radiation of energy by particles. Localized moving particles are irradiated by laser radiation with a frequency that is lower than a frequency of the atomic transition by the Doppler shift quantity. The particle absorbs a photon, is transferred from the primary energy state to an excited energy state. The particle's speed changes by the quantity of the recoil velocity. Then a particle, returning to the ground state, emits a photon with a frequency greater than the frequency of the absorbed photon. This process causes the loss of energy, slowdown the particles and, consequently, the decrease of substance's temperature. Thus, an impulse of a photon is passed to a particle when stimulated absorption and subsequent spontaneous emission of a photon.

For the next «excitation — spontaneous emission of photon» cycle the laser radiation frequency is reduced, adjusts to the particles' velocity. For N cycles, the one particle loses the impulse equal $\Delta p = N\hbar k$, here $\hbar k$ — the impulse of a photon. The number of cycles and the frequency of the cooling radiation are determined by the electronic configuration and velocity of particles [2]. This is the first stage of the laser cooling — the «Doppler laser cooling». It allows reach the temperature at the hundreds of μK . For example, after Doppler cooling of the atoms of alkali metals their temperature is about 100 μK . For more low temperatures other mechanisms of laser cooling are used: the subdoppler and cooling below the recoil level mechanisms. The minimum temperature at subdoppler colling atoms is about 1 μK . Laser cooling below the one-photon level of recoil allows to obtain a temperature about 100 nK [3].

The theory of laser cooling and subsequent localization of the particles was proposed and developed by A. Letokhov and V Balykin in the 1970-s [4]. In 1997 S. Chu, C. Cohen-Tannoudji and W. Phillips were awarded the Nobel prize for research in the sphere of cooling and trapping of atoms using the laser technologies [5].

The practical realization of laser cooling and retaining of cooled particles requires a development of special methods for assessing and monitoring of particles' condition. The group of cooled particles may be represented in the form of an open nonlinear dynamic system with energy dissipation (NDS). Understanding of a specific character of such systems has led to create the methods and instruments of Nonlinear Metrology [6]. The universality of approaches, models and measurement instruments of variables of Nonlinear Metrology allows use them for measurement in various NDS physical and biological origin.

Like an important instrument of Nonlinear Metrology theory the information Shannon entropy is accepted. It's used like a degree of order or chaotic condition of a system. In the framework of Nonlinear Metrology theory proposed the entropy scales for assessment and management of NDS's parameters [7]. The application of this instrument for estimation of cooled particles parameters will improve the reliability of the received information and to ensure control and management of desired parameters.

The research of using the Nonlinear Metrology approaches and instruments for estimate of the particles' parameters during the Doppler laser cooling process is the task of this work.

The Interaction of Two Systems

Let consider the Doppler laser cooling process as the interaction of two corresponded systems. The first system is an ensemble of N localized particles of the same substance — the «atom» system. The «atom» system is characterized by the mean velocity of particles and by the temperature T , which related by next expression:

$$T = \frac{\pi m}{8R} \langle v \rangle^2, \quad (1)$$

here: m — the molecular mass of the particles; R — the universal gas constant.

If the «atom» system is in equilibrium, the velocity distribution of particle $p(v)$ is expressed by the Maxwell distribution law [8].

$$p(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[-\frac{mv^2}{2kT} \right] v^2. \quad (2)$$

here: k — the Boltzmann constant.

The Brownian motion of «atom» system's particles, absorption and emission of photons during the cooling process let describe such system like an open, chaotic and dissipative NDS [9].

The second system is a laser radiation that characterized by a radiation frequency f_0 and the radiation line broadening Δf_0 — the «laser» system. In this case, the frequency distribution of intensity obeys the normal law or the Gaussian distribution [10]:

$$p(f) = \frac{1}{\Delta f_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(f - f_0)^2}{2\Delta f_0^2} \right]. \quad (3)$$

The frequency stabilized laser radiation is characterized by a high degree of coherence $\Delta f_0 / f_0 = 1$ (in scientific laboratories values $\Delta f_0 / f_0$ obtained at special units reach $\sim 10^{-15} - 10^{-17}$). So the «laser» system can be described like a deterministic system. Its parameters stay in the certain frameworks during

the time of observation. The laser operates in a pulsed mode, the pulse duration is determined by the interaction of laser radiation with particles [4].

Let consider the interaction of two systems from the position of the Information theory of measurement. For control of the systems conditions let use the information Shannon entropy that associated with the probability density $p(X)$, here X — the researched variable, by next expression $H = -p(X) \ln p(X)$ [11]. As it was said before it's often used like a degree of order or chaotic condition of NDS. The minimal value the Shannon entropy takes in the case of the normal Gaussian distribution, the maximum value — in the case of the uniform distribution. The entropy of a laser radiation is small, in a case of monochromatic radiation it equates zero. The entropy of an ensemble of particles is determined by the Maxwell distribution. Its value is intermediate between the entropy values for the normal and uniform distributions.

At the initial moment of time the «atom» system is characterized by the average velocity of the particles v_0 , temperature T_0 , and entropy $H_A(v_0, t_0)$. The «laser» system is characterized by the frequency of radiation $f_0 \pm \Delta f_0$, and entropy $H_L(f_0, t_0)$. After stop of interaction at the moment of time $t = \tau$ the systems' parameters are changed. The velocity of the particles decreases, the frequency of the spontaneous emission f increases in comparison with the frequency f_0 , the spectral line of radiation Δf broadens. The «atom» system takes the next characteristics: v , T and $H_A(v, t)$; the «laser» system takes the next characteristics: $f \pm \Delta f$ and $H_L(f, \tau)$. This interaction continues for the number of cycles required to reach a given temperature of the material. For the «atom» system and the «laser» system the formulas for the Shannon entropy at the moments of time t_0 and τ have the next form:

$$\begin{aligned} H_A(v, t_0) &= -p(v_0) \ln p(v_0), \\ H_L(f, t_0) &= -p(f_0) \ln p(f_0), \end{aligned} \quad (4)$$

$$H_A(v, \tau) = -p(v) \ln p(v), \quad H_L(f, \tau) = -p(f) \ln p(f). \quad (5)$$

Here: $H_A(v, \tau) < H_A(v, t_0)$ and the «atom» system becomes more orderly; $H_L(f, \tau) > H_L(f, t_0)$ the «laser» system becomes more chaotic. This situation is caused by the dependence of the Shannon entropy from the distribution density functions and the interval of values. Thus, when particles emit the photons with the frequency higher than the frequency of absorbed photons the particles velocity decreases, the peak of the Maxwell distribution function (2) increases and displaces to the direction of the small velocities. The entropy of the «atom» system reduces. The peak of the distribution function for laser intensity shifts toward the higher frequencies and corresponds to the resonant transition

frequency for a given type of particles. Thus the value of Δf_0 increases in the due to the Doppler broadening, the value of line radiation broadening increases too.

The changing of systems conditions can be expressed using an information, which is acquired (information about the «atom» system I_A) or is lost (information about the «laser» system I_L) in the process of systems interaction [11]:

$$\begin{aligned} I_A &= H_A(v, t_0) - H_A(v, \tau) = \Delta H_A, \\ I_L &= H_L(f, t_0) - H_L(f, \tau) = \Delta H_L. \end{aligned} \quad (6)$$

Using the information conservation law according to which «the amount of information in a closed system remains constant» [11] from the (6) we obtain the equality:

$$|\Delta H_A| = |\Delta H_L|. \quad (7)$$

According to expression (7) the change of the «laser» system entropy by the module equals to the entropy change of the «atom» system. This equality allows analyzing the «laser» system settings change to estimate the parameters of the «atom» system.

The «atom» system entropy takes the minimum value $H_A(v) = 0$ in the case when a thermal motion of the particles stops. The expression (7) at any moment of time can be represented in the next form:

$$|\Delta H_A(\Delta T)| = |\Delta H_L(\Delta f)| \quad (8)$$

The expression (8) solution taking into account expressions (2), (3), (6) will allow to determine the connection between the entropy change of the «laser» system, the entropy and temperature of the «atom» system:

$$\Delta T = \Delta T \left[|\Delta H_L(\Delta f)| \right] \quad (9)$$

The expressions (3)–(9) allow to determine the entropy and temperature change of the «atom» system at the moments t_0 and τ the expression for the entropy difference (6) ΔH_L :

$$\begin{aligned} H_L(f, t_0) &= \ln(\Delta f_0 \sqrt{2\pi e}), \quad H_L(f, \tau) = \ln(\Delta f \sqrt{2\pi e}), \\ |\Delta H_L(\Delta f)| &= \left| \ln \frac{\Delta f_0}{\Delta f} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

Thus, the value of the «laser» system entropy depends of Δf changing (the value of the line radiation broadening). Measuring the frequency of spontaneous radiation and evaluating the entropy change (10) it's a possible to estimate the changes of entropy and temperature of the cooling particles system after any number of cycles «absorption – spontaneous emission of photons». It opens the new possibility for control of the cooling process and temperature estimates with small discrete values ΔT .

The Conclusions


The task of laser Doppler cooling of particles (atoms, ions and molecules), which has important

applications for physics and metrology, is considered. It is shown that the laser cooling is the interaction process between a deterministic system of laser radiation and a chaotic system of moving particles.

For monitoring and estimation of the cooling particles' parameters it's proposed to use the methods and instruments of Nonlinear Metrology that were designed for measurement of nonlinear dynamic systems parameters.

The formula for estimating of the laser radiation Shannon entropy, as a function of a laser frequency, is obtained. The results allow to evaluate the change of the entropy of the cooling particles system after a given number of cycles «absorption — spontaneous emission of photons», which opens the new possibility for control of laser cooling process and estimate of temperature with small discrete values.

References

1. Brazhnikov, D.V. Research of possibility of deep laser cooling of magnesium atoms for creating of new generation frequency standard. // Bulletin of NSU, Series «Physics», 2012, Vol. 7, Iss. 14, p.p. 6—18.
2. Letokhov V.S., Minogin V.G., Pavlik, B.D. Cooling and trapping of atoms and molecules by resonance laser field. // JETP. — 1977. — Vol. 72. — pp. 1328—1342.
3. Balykin A, Atom optics and its applications // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. — 2011. — Vol. 81, No. 4. — pp. 291—315.
4. Balykin V.I., Letokhov V.S., V.G. Minogin. Cooling of atoms by laser radiation pressure. // Phys.— 1985. — Vol. 147, Iss. 1. — p.p. 117—156.
5. D.W. Philips. Laser colling and trapping of neutral atoms. Nobel lecture. — 1997.
6. Machekhin Yu.P., Kurskoy Y.S. Fundamentals of nonlinear metrology. // LAP Lambert Academic Publishing. — 2014. — 240 p.
7. Machekhin Yu., Kurskoy Yu. Features of entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems // Metrology and devices. — 2013 — Vol. 06 (44). — p.p. 17—21.
8. Klimontovich Yu.L. Statistical physics. — M.: Nauka, 1982. — 608 p.
9. Loskutov A.Yu. Charm of chaos // UFN. — 2010. — 180. — No. 12. — pp. 1304—1329.
10. Zvelto O. Principles of lasers. — M.: Lan, 2008, — 720 p.
11. Wolkenstein M.V. Entropy and information. — M.: Nauka, 1986. — 192 p. 

Отримано / received: 12.11.2015.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Є.М. Одаренком (Україна).
Prof. E.M. Odarenko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.