

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

№ 2(7), 2022

DOI:10.30857/2786-5371.2022.2

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2022

Засновником видання «Технології та інжиніринг» є

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Науковий фаховий журнал є правонаступником видання «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну», який у свою чергу був правонаступником видання «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР).

№ 2(7), 2022

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія KB №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 993 від 24.07.2002 р.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України.

Наказ МОН України від 29.06.2021 №735 (додаток 3). Категорія Б. Технічні науки. Спеціальності: 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (2018, 2020).

ISSN 2786-5371 print

ISSN 2786-538X online

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція)

Журнал реферується та індексується у наступних міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Засновник і видавець:

Київський національний університет технологій та дизайну
Україна, 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2

Головний редактор:

Панасюк І.В., д.т.н., професор

Заступник

головного редактора:

Злотенко Б. М., д.т.н., професор

**Відповідальний
секретар:**

Кривонос О. О.

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: Мехатронні системи. Ресурсозбереження та енергоефективність. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2, корп. 1, к. 1-331а

тел./факс: +38 (044) 256-84-27

e-mail: vistnuk@knutd.edu.ua; <http://vistnyk.knutd.edu.ua/>

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 8 від 22.06.2022 р.

Матеріали друкуються мовою оригіналу. Відповідальність за переклад, достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей. Передруки та переклади статей дозволяються лише за згодою автора (-ів) та редакції.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Issue 2(7), 2022

DOI:10.30857/2786-5371.2022.2

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2022

The owner of «Technologies and Engineering» is

KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND DESIGN

This Scientific Specialized Journal is the successor of the edition "Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design", which in turn was the legal successor of the edition «Proceedings of Higher educational establishments. Technology of the light industry», which was published by Kiev Technological Institute of Light Industry from March, 1958 (USSR).

№ 2(7), 2022

The state registration of print media is KB № 24822-14762 IIP, originating date 19.04.2021

License for publishing activity is ДК №993, originating date 24.07.2002

The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: №735 dated 29.06.2021 “Technologies and Engineering” in the list of professional publications: cat. B, technical specialties – 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (from 2018, 2020).

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Owner and Publisher:

Kyiv National University of Technologies and Design
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenka, Str.

Editor-in- Chief:

Igor V. Panasiuk - Dr., professor

Deputy Editor:

Borys M. Zlotenko - Dr., professor

Executive secretary:

Olena O. Kryvonos

Scientific fields: Mechatronic systems. Energy Efficiency and Resource-saving Technologies. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies

The journal is aimed at a wide range of researchers, professors, students, and graduate students and to bring the results of scientific research carried out under a variety of intellectual traditions and organizations of procedures to the attention of a specialized readership.

EDITORIAL OFFICE:

01011, Ukraine, Kyiv, 2, Nemyrovych-Danchenka, Str., office 1-331a

Tel./fax: +38 (044) 256-84-27

e-mail: vistnuk@knutd.edu.ua; <http://vistnyk.knutd.edu.ua/>

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 8, originating date 22.06.2022.

Articles are published in the original language. The authors are responsible for the translation, authenticity of facts, quotations, proper names, geographic names, names of enterprises and other information.

The Editorial Office's and author's consent is needed prior to republishing or translating the articles.

**ВІДОМОСТІ ПРО ЧЛЕНІВ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
наукового фахового журналу
«ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ»
"TECHNOLOGIES AND ENGINEERING"**

Панасюк Ігор Васильович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *головний редактор*.

Злотенко Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора*.

**СЕКЦІЯ: МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ
ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

Шведчикова Ірина Олексіївна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Осипенко Володимир Васильович – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Білоус Інна Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Денисюк Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Жуйков Валерій Якович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Мілих Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Стаценко Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Суходуб Ірина Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Хоменко Володимир Григорович – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Чорний Олексій Петрович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна.

Шавьолкін Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Atef Saleh Almashakbeh, Doctor of Engineering, Tafila Technical University, Aţ Ţafilah, Jordan.

Jasim Mohmed, Docent, PhD, Al-Furat Al-Awsat Technical University – Al-Musssaib Technical college, Kufa, Iraq.

Skibniewski Miroslaw – Prof., Ph.D., Dr.h.c., Honor. Prof., Department of Civil & Environmental Engineering A. James Clark School of Engineering University of Maryland, College Park, USA

**СЕКЦІЯ: МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ
ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ**

Березненко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Галавська Людмила Євгеніївна – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Арабулі Світлана Іванівна – кандидат технічних наук, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Гараніна Ольга Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Касьян Едуард Євгенович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Кизимчук Олена Павлівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Очеретна Лариса – PhD, доцент, Люберецький технічний університет, Чеська республіка.

Славінська Алла Людвигівна – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна.

Хімічева Анна Іванівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Барсуков В'ячеслав Зіновійович – доктор хімічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*.

Плаван Вікторія Петрівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*.

Андрєєва Ольга Адіславівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Баула Ольга Петрівна – кандидат хімічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Бессарабов Володимир Іванович, доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Будаш Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Картель Микола Тимофійович – доктор хімічних наук, професор, академік НАН України.

Кузьмінський Євген Васильович – доктор хімічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

Левицький Володимир Євстахович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Савченко Богдан Михайлович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Скорохода Володимир Йосипович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Страшний Владислав Володимирович – доктор фармацевтичних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна.

Jaskuła Marian – professor, Faculty of Chemistry, Jagiellonian University, Cracow, Poland.

Valeika Virgilijus – professor, PhD, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.

ЗМІСТ

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

1. **АЛЛАХВЕРДІЄВ Е. Н.**
Алгоритм вибору витратоміру з оптимальними параметрами 9
2. **ДВОРЖАК В. М., МАНОЙЛЕНКО О. П.,
КРИКУН Є. С., КЛІННІКОВ А. В.**
Аналіз точності відтворення функції положення механізмом
третього класу для коливального руху вушкових голок
основов'язальної машини 21
3. **ОРЛОВСЬКИЙ Б. В., МІСЯЦЬ М. В.**
Порівняльний аналіз функціонально-адекватних захватів
маніпуляторів завантаження швейних машин деталями крою
з текстилю 30

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

4. **КИЗИМЧУК О. П., МЕЛЬНИК Л. М.**
Методи визначення контактного тиску компресійного
трикотажу 46

TABLE OF CONTENTS

MECHATRONIC SYSTEMS. RESOURCE SAVING & ENERGY EFFICIENCY

1. **ALLAHVERDIYEV E. N.**
Algorithm for selecting a flow meter with optimal parameters 9
2. **DVORZHAK V. M., MANOILENKO O. P.,
KRYKUN Ye. S., KLINNIKOV A. V.**
Analysis of the accuracy of reproducing the position function by
the mechanism of the third class for the oscillational movement
of the eye needle of the bond knitting machine 21
3. **ORLOVSKY B. V., MISIATS M. V.**
Comparative analysis of functionally-adequate captures of
manipulators of loading of sewing machines by textile cutting
details 30

MATERIAL SCIENCE IN THE TEXTILE, CLOTHING AND FOOTWEAR MANUFACTURING INDUSTRIES

4. **KYZYMCHUK O. P., MELNYK L. M.**
Measurement methods for contact pressure of compression
knitted garment 46

УДК 681.121.8:
681.122

ALLAHVERDIYEV E. N.
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

ALGORITHM FOR SELECTING A FLOW METER WITH OPTIMAL PARAMETERS

Problems. In many cases, the problem arises of choosing from a variety of alternatives to measuring instruments necessary for measuring the parameters of a technological process. So as that measuring instruments with different designs, operating principles and different technical and technological parameters are produced by different manufacturers. One of the important problems in the development of these systems is the selection of measuring instruments with optimal operational and metrological characteristics in accordance with the manufacturer's specifications and the terms of reference for the system design.

Methodology. Multiple criteria decision-making (MCDM) are used in order to solve problems related to several criteria. The high accuracy sensors ensure accurate readings, although there are several parameters involved in measuring process: flow rate; gas or gases used; temperature; operating pressure; pressure drop; price; accuracy; response time; warm-up time; stable measurement range (turndown) gas is selected.

Findings. Selection process of the optimal gas flow meter for information-measuring system is considered. Criteria for selection of the flow meters is studied, shown that the selection process is multi-criterial problem. Algorithm for selection of the gas flow meter is proposed. Proposed algorithm based on AHP method and TOPSIS. An idea of algorithm is following. Initially experts select some alternatives, which meet all requirements for flow meters of different suppliers. At the next step the relative criteria of importance are calculated. After that decision matrixes are composed by which determine the preferences for the goals.

Originality. Better alternative or flow meter with optimal parameters is determined by ranking of all alternatives.

Practical value. Applying of the proposed algorithm increases reliability of the final decision and automates the selection process by using of the corresponding software.

Keywords: gas flow meter; selecting algorithm; multi-criteria; decision making.

Introduction. The flow meters differ in the way of measuring the flow. A flow meter is measuring the flow either directly or indirectly. Results of this measurement may or may not depend on fluid properties. For example, one flow meter indicates mass flow calculated indirectly based on a differential pressure and given gas properties, and another flowmeter measures mass flow directly. In many cases, the problem arises of choosing from a variety of alternatives to measuring instruments necessary for measuring the parameters of a technological process. So as that measuring instruments with different designs, operating principles and different technical and technological parameters are produced by different manufacturers. One of these measuring instruments is a gas flow meter. At present, flow meters of various designs with a simple operating principle are used to measure and account for the flow (amount) of gas. The information and measurement systems to which these devices are connected can also be built on the basis of various concepts. Accurate measurements and metering of natural gas during production, transportation and distribution is very important in terms of optimizing these processes. One of the important problems in the development of these systems is the selection of measuring instruments with optimal operational and metrological characteristics in accordance with the manufacturer's specifications and the terms of reference for the system design.

Flow meter technologies. Naturally, such a choice is made using existing criteria and methods, based on information about the principle of operation of these devices, about the parameters that determine their design, about metrological indicators (accuracy and error, etc.), methods of receiving and transmitting information, about operating temperature and pressure, about the type of output signal and the functionality of measuring instruments [1].

Two primary thermal measuring methods of flow. The flow directly is measured by temperature sensors in each method. Measurements results in thermal method depend on gas properties, which depend on temperature of gas, so used gas tables that loaded into them [2].

The first method is the flow meter with the thermal bypass. It operates by following way. The small portion of the fluid directs to flow through a capillary tube which is wrapped by heating element with temperature sensors on the both sides. If there is no flow, temperature difference between the sensors is zero [3]. But the incoming flow passes the first sensor, then it heated as it passes the heating element, so second sensor indicates raised temperature. The temperature difference between these sensors will be directly proportional to the value of flow.

The second method uses of the thermal MEMS or CMOS for measuring of the flow. It operates on the differential temperature between the heated sensor and sensor that measures the flow temperature. If there is no flow, the difference between the temperature sensors is constant. A flow cools the flow temperature sensor, and to compensate for this change a heating current is increased. The value of this current will be proportional to the gas flow [4]. The largest advantages of instruments with MEMS sensor over thermal bypass devices are the small inertia and small size.

Another type of mass flow meters uses of the Coriolis principle to measure the mass flow independently of fluid properties. This sensor consists of one or two tubes, that are oscillated at the tube's resonant frequency by the special electromagnet. The mechanical waves of tubes are measured by sensors at different points along of the tube [5]. If there is no flow, the oscillates on the tube propagate symmetrically, and there is no phase shift between the measuring points. Twisting of the tube during the flow passes through it, causes a phase shift between the measuring points that is proportional to the mass flow rate. These measurements do not dependence on pressure. The only temperature influence will cause of changing of frequency of mechanical oscillations, that leads to zero shifts, which is smaller than other measurement methods [6].

In the laminar flowmeters measuring of the mass flow performed indirectly based on differential pressure. In these flowmeters contain of the elements that convert turbulent flow into laminar [7]. A sensor is carried out measurements of the pressure drop on these elements, and the flowmeter uses this data in Poiseuille equation to determination a volumetric flow rate. The flowmeter then converts of this measurement results to standardized mass flow using tables of gas properties that take into account of the temperature and pressure influence. The high accuracy sensors ensure accurate readings, although there are several parameters involved in measuring process. So as the mass flow value is different for each gas, for choosing a mass flow meter it is necessary to take into account following of the 10 parameters [8]:

1. Flow rate.
2. Gas or gases used.
3. Temperature.
4. Operating pressure.
5. Pressure drop.
6. Price.
7. Accuracy.
8. Response time.
9. Warm-up time.
10. Stable measurement range (turndown) gas is selected.

Research method. Multiple criteria decision-making [9] (MCDM) are used in order to solve problems related to several criteria. Multiple criteria decision-making are regrouped into two partssections AHP and TOPSIS applied in the field of this research. AHP method is an mostly applied MCDM technique. It provides a structural and hierarchical method for formulate software for the selection problems and used to carried out of calculation of the weights of selection criteria [18], and

TOPSIS technique is applied to ranking of the alternative based on the overall performance of them. The integrated methodology proposed above has some advantages compared to the techniques proposed in the literature, as follows: 1) it is suitable for the evaluation and selection of flowmeter regarding to preferences of the experts depending on their experiences; 2) the weights of multiple and conflicting criteria can be obtained by pair-wise comparisons according to decision-makers' preferences; and 3) the total ranking of the computed alternatives is ensured [10].

AHP method is the structuring process the decision hierarchy taking into account the goal of the studied problem [24] and determination of the criteria and sub-criteria and formulating a set of all estimations in the comparison matrix, where the set of elements is compared with another by using based on scale of pair-wise comparison [12].

TOPSIS method proposed in [14] for solving decision making problems with multiple criteria. the concept of this method based on the choosing alternative that should have the shortest distance to the positive ideal solution (A^*) and the longest distance from the negative ideal solution (A^-). For example, on the positive ideal solution the functionality is maximized and the cost is minimized, meanwhile on the negative ideal solution the cost is maximized and the functionality is minimized [11]. In the solution process by TOPSIS, the performance ratings of studied object and the weights of the criteria should be given as exact values [16]. Recently, several interesting studies have focused on the TOPSIS technique and applied it in many fields, including supplier selection, tourism destination evaluation, financial performance evaluation, location selection, company evaluation, and ranking the carrier alternatives. Examples of those studies are described in the literature: ERP software selection [13], design process of the customer-driven product [18], open-source for EMR software packages [33]. Let us consider development of TOPSIS model.

Statement of the problem. This multi-criterion decision-making problem contains different and conflicting criteria. [15] Therefore, after analyzing the necessary parameters of the flow meters included in the set for selection, these flow meters were selected finally by experts according to four main criteria: C_1 -accuracy, C_2 -reliability, C_3 -survivability, C_4 -price and cost of maintenance. Next, we solve the problem of selecting a flow meter from the resulting series with alternatives (A, B, C, D) [17].

The relative importance between the two criteria for selecting of the gas flow meter is measured on a numerical scale from 1 to 9, as represented in Table 1.

Table 1

Relative importance	
Value	Interpretation
1	j and k equally important
3	j is slightly more important than k
5	j is strongly more important than k
7	j is very strongly more important than k
9	j is absolutely strongly more important than k

Table 2 shows the ratings of linguistic performances according to various criteria.

Table 2

Linguistic performance rating				
Criteria	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	1/5	1/3	5
C_2	5	1	5	1/7
C_3	3	1/5	1	3
C_4	1/5	7	1/3	1

Pair wise comparisons are not required if the items being compared are expressed in the same units and using an appropriate precision meter. The answer to the question of how important one item is over another is presented as a simple combination of the dimensions of all items [19].

So, let's solve the problem of choosing a gas flow meter for an information-measuring system according to many criteria using an algorithm proposed below.

Solutions of the problem. This algorithm is a combination of the AHP (Analytical Hierarchy Process) and TOPSIS methods. AHP, proposed by Saaty, is a multi-criterial decision-making method used to assess and determine the importance of relative weights for decision criteria [20].

It is widely used to analyze and structure complex decision-making problems. The decision-making process is initially divided into various criteria. The AHP method can be applied to make decision in calculating weights for each criterion and evaluating them by pairwise comparison. AHP has attracted the interest of many researchers, mainly because of the excellent mathematical properties of the method and the ease of obtaining the required input data. The AHP method is a stable and flexible decision-making tool in a multi-criteria environment for solving complex decision-making problems. This method separates a complex system into a system of hierarchical elements, usually consisting of goals, evaluation criteria and alternatives. The assessment criteria level can be composed of various assessment criteria, which can be extended to a multi-level structure. There are following main steps of the AHP methodology [21]:

Step 1: Formation of the decision matrix. The rows of the decision matrix contain the alternatives that are given priority, and the columns contain the criteria used in making decisions. This matrix is the original matrix created by the decision maker. The decision matrix is displayed as follows:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

where m is the number of alternatives; n is the number of evaluation factors – criteria.

Step 2: Formation of the standard decision matrix R . The standard decision matrix is calculated using the elements of the matrix A by the following formula [23]:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}}. \quad (2)$$

The R matrix looks like this:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Step 3: Formation of the standard weighted decision matrix (V).

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Step 4: Ranking of the scenario, which is done by sorting the total points in descending order.

One of the multi-criteria decision-making models is the TOPSIS [22]. This method was developed to solve the problem of multi-criteria decision-making based on the concept that the chosen alternative is at the shortest distance from the positive ideal solution (A^+) and the largest distance from the negative ideal solution (A^-) [25]. The TOPSIS method is used to obtain the final rating. Some of the advantages of this method are simplicity, rationality, good understanding, good computational efficiency, and the ability to measure the relative capabilities of each alternative in a simple mathematical way. The chosen alternative should be located at the shortest distance from the positive ideal solution and at the greatest distance from the negative ideal solution [27].

The main stages of multi-criteria decision-making are as follows [30]:

Step 1: Formation of a normalized decision matrix that transforms properties of different dimensions into dimensionless properties, allowing you to compare properties using formula (2).

Step 2: Formation of a weighted normalized decision matrix using formula (4).

Step 3: Calculate the positive ideal (A^+) and negative ideal (A^-) solutions. The TOPSIS method assumes that each factor - assessment criterion has a monotonically increasing or decreasing character [26]. Calculation of the set of ideal solutions by the following formula:

$$A^+ = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right) \right\} \\ A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (5)$$

Step 4: The set of negative ideal solutions chooses the largest of the values in the columns of the matrix V (the largest when the corresponding criterion is maximized). The set of negative ideal solutions is calculated using the following formula:

$$A^- = \left\{ \min_i v_{ij} \mid j \in J, \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right) \right\} \\ A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (6)$$

Step 5: Calculating distance values. Distance from positive ideal solution

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}. \quad (7)$$

Distance from negative ideal solution

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}. \quad (8)$$

Step 6: Determination of the relative closeness to the ideal solution.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}. \quad (9)$$

Step 7. Priority row ranking: Alternatives C can be ranked in descending order.

Considering the steps described above we solve problem of the selection of the gas flow meter [31].

It is recommended to investigate the properties of the comparison matrix during accurate measurements. A pairwise comparison matrix is a consistent matrix for accurately comparing any number of items.

AHP is a powerful method and can be used to make decisions during many conflicting criteria and both qualitative and quantitative aspects of the decision are considered. AHP allows to pairwise comparison of complex solutions [32].

First, using formula (2), we determine the preferences for the goals shown in Tables 1 and 2, and the weights calculated for these goals [28].

$$C_{11} = \frac{1}{\left(1 + 5 + 3 + \frac{1}{5}\right)} = 0,11.$$

Average weight for

$$C_1 = \frac{(0,11 + 0,06 + 0,04 + 0,55)}{4} = 0,18.$$

Other calculated weights (average)

$$C_2 = 0,36; C_3 = 0,21; C_4 = 0,25$$

Table 3

Weights for criteria

Criteria	C_1	C_2	C_3	C_4	Average
C_1	0.11	0.06	0.04	0.55	0.18
C_2	0.54	0.12	0.75	0.015	0.36
C_3	0.33	0.02	0.15	0.33	0.21
C_4	0.02	0.83	0.05	0.11	0.25

At the next stage, we define for each alternative different relative criterion. The relative values of properties and functionality were calculated as examples and are presented in Table 4.

Table 4

Property and functionality values

C_1	A	B	C	D	
A	1	1/3	5	1/3	
B	3	1	1/3	1/3	
C	1/5	3	1	5	
D	3	3	1/5	1	
C_1	A	B	C	D	Average
A	0.14	0.05	0.76	0.05	0.25
B	0.42	0.14	0.05	0.05	0.34
C	0.03	0.41	0.15	0.75	0.34
D	0.42	0.41	0.08	0.15	0.27

In the same way, we determine the relative values for other alternatives and results shown in table 4.

Table 5

Relative values for alternatives				
Criteria	A	B	C	D
C_1	0.25	0.34	0.34	0.27
C_2	0.05	0.44	0.31	0.25
C_3	0.21	0.38	0.36	0.40
C_4	0.51	0.01	0.29	0.19

Finally, we calculate the weights for the alternatives (Table 3) and rank them according to the relative values for every alternative (Table 4):

$$\begin{aligned}
 A &= 0,25 \cdot 0,18 + 0,05 \cdot 0,36 + 0,21 \cdot 0,21 + 0,51 \cdot 0,25 = \\
 &= 0,045 + 0,018 + 0,044 + 0,127 = 0,23; \\
 B &= 0,34 \cdot 0,18 + 0,44 \cdot 0,36 + 0,38 \cdot 0,21 + 0,01 \cdot 0,25 = \\
 &= 0,061 + 0,0158 + 0,08 + 0,0025 = 0,25; \\
 C &= 0,34 \cdot 0,18 + 0,31 \cdot 0,36 + 0,36 \cdot 0,21 + 0,29 \cdot 0,25 = \\
 &= 0,061 + 0,011 + 0,075 + 0,11 = 0,25; \\
 D &= 0,27 \cdot 0,18 + 0,25 \cdot 0,36 + 0,40 \cdot 0,21 + 0,19 \cdot 0,25 = \\
 &= 0,049 + 0,09 + 0,084 + 0,047 = 0,27.
 \end{aligned}$$

After ranking the alternatives, we determine that alternative D is better than the other alternatives.

The TOPSIS is used to decide by computer, and the best alternative chosen would be the shortest distance from the positive and the longest distance from the negative ideal solution. After forming the normalized and weighted normalized matrix (table 6), we determine the ideal and negative ideal solutions by formulas (5) and (6) [28]:

Table 6

Weight Normalized Matrix				
	C_1	C_2	C_3	C_4
A	0.25	0.05	0.21	0.51
B	0.34	0.44	0.38	0.01
C	0.34	0.31	0.36	0.29
D	0.27	0.25	0.40	0.19

At the next stage, the distance from the ideal solution and the distance from the negative ideal solution are calculated by using formulas (7) and (8). Thus, for alternative A will have got:

$$S_A^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (A_{ij} - A^*)^2} = (0,25 - 0,34) + (0,05 - 0,44) + (0,21 - 0,40) + (0,51 - 0,51) = 0,41$$

$$S_A^- = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (A_{ij} - A^-)^2} = (0,25 - 0,25) + (0,05 - 0,05) + (0,21 - 0,21) + (0,51 - 0,01) = 0,5$$

Relative closeness to ideal solution

$$C_A^* = \frac{S_A^-}{S_A^- + S_A^+} = \frac{0,5}{(0,41 + 0,5)} = 0,54$$

For other alternatives

$$C_B^* = \frac{S_B^-}{S_B^- + S_B^*} = \frac{0,43}{(0,50 + 0,43)} = 0,46;$$

$$C_C^* = \frac{S_C^-}{S_C^- + S_C^*} = \frac{0,42}{(0,29 + 0,42)} = 0,59;$$

$$C_D^* = \frac{S_D^-}{S_D^- + S_D^*} = \frac{0,33}{(0,10 + 0,32)} = 0,78.$$

After ranking the alternatives, we find that alternative D is superior to the other alternatives.

Thus, considering the opinion of an expert or experts, using the AHP and TOPSIS methods, based on the selection criteria, we refine the decision on choosing a flow meter among alternatives, which is superior in parameters and indicators [29].

CONCLUSIONS

Selecting the flowmeter with optimal parameters for an application is not complicated, if knowing what parameters are important and how does take into account. This way will be doing order makes the decision much easy. For the significantly narrowing of choosing area it is necessary by first ensuring requirements for flow rate, temperature and gas properties are met. Then, take into account of the controlled parameters: an operating pressure and pressure drop. After this, analysis budget and specific parameters of application. It is concerned such as accuracy, warm-up and response time, dynamic range of some controlled parameters. All steps and these recommendations, will help choosing of the optimal mass flowmeter based on solution by taking into account of the requirements of a proposed methodology.

Proposed algorithm consisted of two methods uses initial information about selection of the required measurement device with optimal parameters.

Initial information prepared by experts, who study all technical and metrology parameters of the device and prepares information about alternative devices. This information is processed in the next stage for find optimal device by proposed algorithm, that allows automate decision making above mention process.

References

1. Allahverdiyev, E. N. (2020). Solution of the gas flowmeter selection problem for information-measuring system. *The 7th International conference on Control and optimization with Industrial Applications - COIA-2020*. Baku. Proceedings of COIA 2020. Vol. II, P. 95.
2. Saaty, T. L. (1990). An exposition of the AHP in reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process". *Management Sci.*, 36(3): 259–268.
3. Hwang, C. L., Yoon, K. (1981). Multiple Attributes Decision Making. Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Springer, Berlin Heidelberg. Vol. 186.
4. Amiri, M. P. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Expert Syst Appl.*, 37(9): 6218–6224.

Література

1. Allahverdiyev E. N. Solution of the gas flowmeter selection problem for information-measuring system. *The 7th International conference on Control and optimization with Industrial Applications – COIA-2020*. Baku, 2020. Proceedings of COIA 2020, Vol. II, p.95.
2. Saaty T. L. An exposition of the AHP in reply to the paper "Remarks on the analytic hierarchy process". *Management Sci.* 1990. Vol. 36, No. 3. P. 259–268.
3. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attributes Decision Making. Methods and Applications A State-of-the-Art Survey. Springer, Berlin Heidelberg, 1981. Vol. 186.
4. Amiri M. P. Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Expert Syst Appl.* 2010. No. 37(9). P. 6218–6224.

5. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Syst Appl.*, 39(17): 13051–13069.
6. Dağdeviren, M., Yavuz, S., Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Syst Appl*, 36(4): 8143–8151.
7. Ding, J.-F. (2012). Using Fuzzy MCDM Model to Select Middle Managers for Global Shipping Carrier-based Logistics Service Providers. *WSEAS Transactions On Systems*, 11(3).
8. Duran, O. (2011). Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach. *Adv Eng Software*, 42(10): 821–829.
9. Eldrandaly, K., Naguib, S. (2013). A Knowledge-Based System for GIS Software Selection. *Int Arab J Inf Technol*, 10(2).
10. Flintsch, G., Zaniewski, J., Delton, J., Medina, A. (1998). Artificial Neural Network Based Project Selection Level Pavement Management System. In *4th International Conference on Managing Pavements*.
11. Gumus, A. T. (2009). Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Syst Appl*, 36(2): 4067–4074. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.03.013.
12. Guo, J., White, J., Wang, G., Li, J., Wang, Y. (2011). A genetic algorithm for optimized feature selection with resource constraints in software product lines. *J Syst Software*, 84(12): 2208–2221.
13. Huiqun Huang, Guang Sun (2012). ERP Software Selection Using the Rough Set and TPOSIS Methods Under Fuzzy Environment. *Int J Adv Inf Sci Serv Scis*, (3): 111–118. DOI: 10.4156/aiss.vol4.issue 3.15.
14. Hwang, C. L., Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: methods and applications. Springer, Heidelberg.
15. Kimball, R., Caserta, J. (2004). The data warehouse ETL toolkit practical techniques for extracting, cleaning, conforming, and delivering data. In chapter 2.
16. Lengacher, D., Cammarata, C. (2012). A Two-Phase Data Envelopment Analysis Model for Portfolio Selection. *Adv Decision Sci*, 2012: 1–9.
17. Liberatore, M. J., Nydick, R. L. (1997). Group Decision Making In Higher Education Using The Analytic Hierarchy Process. *Res Higher Educ*, 38(5): 593–614.
5. Behzadian M., Otaghsara S. K., Yazdani M., Ignatius J. A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Syst Appl*. 2012. No, 39(17). P. 13051–13069.
6. Dağdeviren M., Yavuz S., Kılınç N. Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Syst Appl*. 2009. No. 36(4). P. 8143–8151.
7. Ding J.-F. Using Fuzzy MCDM Model to Select Middle Managers for Global Shipping Carrier-based Logistics Service Providers. *WSEAS Transactions On Systems*. 2012. No. 11(3).
8. Duran O. Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach. *Adv Eng Software*. 2011. No. 42(10). P. 821–829.
9. Eldrandaly K., Naguib S. A Knowledge-Based System for GIS Software Selection. *Int Arab J Inf Technol*. 2013. No. 10(2).
10. Flintsch G., Zaniewski J., Delton J., Medina A. Artificial Neural Network Based Project Selection Level Pavement Management System. In *4th International Conference on Managing Pavements*. 1998.
11. Gumus A. T. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Syst Appl*. 2008. No. 36(2). P. 4067–4074. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.03.013.
12. Guo J., White J., Wang G., Li J., Wang Y. A genetic algorithm for optimized feature selection with resource constraints in software product lines. *J Syst Software*. 2011. No. 84(12). P. 2208–2221.
13. Huiqun Huang, Guang Sun. ERP Software Selection Using the Rough Set and TPOSIS Methods Under Fuzzy Environment. *Int J Adv Inf Sci Serv Scis*. 2012. No. 4(3). P. 111–118. DOI: 10.4156/aiss.vol4.issue 3.15.
14. Hwang C. L., Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. Springer, Heidelberg, 1981.
15. Kimball R., Caserta J. The data warehouse ETL toolkit practical techniques for extracting, cleaning, conforming, and delivering data. In chapter 2. 2004.
16. Lengacher D., Cammarata C. A Two-Phase Data Envelopment Analysis Model for Portfolio Selection. *Adv Decision Sci*. 2012. P. 1–9.
17. Liberatore M. J., Nydick R. L. Group Decision Making In Higher Education Using The Analytic Hierarchy Process. *Res Higher Educ*. 1997. No. 38(5). P. 593–614.

18. Lin, H. Y., Hsu, P. Y., Sheen, G. J. (2007). A fuzzy-based decision-making procedure for data warehouse system selection. *Expert Syst Appl*, 32(3): 939–953.
19. Lin, M. C., Wang, C. C., Chen, M. S., Chang, C. A. (2007). Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process. *Comput Industry*, 59(1): 17–31. DOI: 10.1016/j.compind.2007.05.013.
20. Liu, X. (2012). The site selection of distribution center based on linear programming transportation method. In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*.
21. Mousavi, S., Tavakkoli-Moghaddam, M. R., Heydar, M., Ebrahimnejad, S. (2012). Multi-Criteria Decision Making for Plant Location Selection: An Integrated Delphi–AHP–PROMETHEE Methodology. *Arab J Sci Eng*, 38(5): 1255–1268.
22. Onder, E., Dag, S. (2013). Combining Analytical Hierarchy Process and TOPSIS Approaches for Supplier Selection in A Cable Company. *J Business, Econ Finance*, 2(2).
23. Panda, B. N., Biswal, B. B., Deepak, B. B. L. V. (2014). Integrated AHP and fuzzy TOPSIS Approach for the Selection of a Rapid Prototyping Process under Multi-Criteria Perspective.
24. Saaty, T. L. (2008). Decision Making with The Analytic Hierarchy Process. *Int J Serv Sci*, 1(1): 83.
25. Saaty, T. L., Vargas, L. G. (2001). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. *International Series in Operations Research and Management Science*.
26. Simitsis, A., Vassiliadis, P., Dayal, U., Karagiannis, A., Tziovara, V. (2009). Benchmarking ETL Workflows. *Lecture Notes in Computer Science*. P. 199–220.
27. Tsaor, R.-C. (2011). Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Appl Maths Comput*, 218(8): 4295–4304.
28. Wei, C.-C., Chien, C.-F., Wang, M.-J. (2005). An AHP-based approach to ERP system selection. *Int J Prod Econ*, 96(1): 47–62.
29. Wu, K.-Y. (2010). Constructing Evaluation Model for Sustainable Development Community Health and Welfare. *WSEAS Trans Syst*, 9(10): 1073–1085.
30. Wyatt, L., Caufield, B., Pol, D. (2009). Principles for an ETL Benchmark. *Lecture Notes in Computer Science*. P. 183–198.
18. Lin H. Y., Hsu P. Y., Sheen G. J. A fuzzy-based decision-making procedure for data warehouse system selection. *Expert Syst Appl*. 2007. No. 32(3). P. 939–953.
19. Lin M. C., Wang C. C., Chen M. S., Chang C. A. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process. *Comput Industry*. 2007. No. 59(1). P. 17–31. DOI: 10.1016/j.compind.2007.05.013.
20. Liu X. The site selection of distribution center based on linear programming transportation method. In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2012.
21. Mousavi S., Tavakkoli-Moghaddam M. R., Heydar M., Ebrahimnejad S. Multi-Criteria Decision Making for Plant Location Selection: An Integrated Delphi–AHP–PROMETHEE Methodology. *Arab J Sci Eng*. 2012. No. 38(5). P. 1255–1268.
22. Onder E., Dag S. Combining Analytical Hierarchy Process and TOPSIS Approaches for Supplier Selection in A Cable Company. *J Business, Econ Finance*. 2013. No. 2(2).
23. Panda B.N., Biswal B.B., Deepak B.B.L.V. Integrated AHP and fuzzy TOPSIS Approach for the Selection of a Rapid Prototyping Process under Multi-Criteria Perspective. 2014.
24. Saaty T. L. Decision Making with The Analytic Hierarchy Process. *Int J Serv Sci*. 2008. No. 1(1). P. 83.
25. Saaty T. L., Vargas L. G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. *International Series in Operations Research and Management Science*. 2001.
26. Simitsis A., Vassiliadis P., Dayal U., Karagiannis A., Tziovara V. Benchmarking ETL Workflows. *Lecture Notes in Computer Science*. 2009. P. 199–220.
27. Tsaor R.-C. Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Appl Maths Comput*. 2011. No. 218(8). P. 4295–4304.
28. Wei C.-C., Chien C.-F., Wang M.-J. An AHP-based approach to ERP system selection. *Int J Prod Econ*. 2005. No. 96(1). P. 47–62.
29. Wu K.-Y. Constructing Evaluation Model for Sustainable Development Community Health and Welfare. *WSEAS Trans Syst*. 2010. No. 9(10). P. 1073–1085.
30. Wyatt L., Caufield B., Pol D. Principles for an ETL Benchmark. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009. P. 183–198.

31. Yigit, T., Isik, A. H., Ince, M. (2014). Web-based learning object selection software using analytical hierarchy process. *IET Software*, 8(4): 174–183. doi:10.1049/iet-sen.2013.0116.
32. Yoo, K. E., Choi, Y. C. (2006). Analytic hierarchy process approach for identifying relative importance of factors to improve passenger security checks at airports. *J Air Trans Manage*, 12(3):135–142.
33. Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Al-Haiqi, A., Kiah, M. L. M., Hussain, M., Abdulnabi, M. (2015). Evaluation and selection of open-source EMR software packages based on integrated AHP and TOPSIS. *J Biomed Inform*, 53: 390–404. DOI: 10.1016/j.jbi.2014.11.012.

31. Yigit T., Isik A. H., Ince M. Web-based learning object selection software using analytical hierarchy process. *IET Software*. 2014. No. 8(4). P. 174–183. doi:10.1049/iet-sen.2013.0116.
32. Yoo K. E., Choi Y. C. Analytic hierarchy process approach for identifying relative importance of factors to improve passenger security checks at airports. *J Air Trans Manage*. 2006. No. 12(3). P. 135–142.
33. Zaidan A. A., Zaidan B. B., Al-Haiqi A., Kiah M. L. M., Hussain M., Abdulnabi M. Evaluation and selection of open-source EMR software packages based on integrated AHP and TOPSIS. *J Biomed Inform*. 2015. No. 53. P. 390–404. DOI: 10.1016/j.jbi.2014.11.012.

ALLAHVERDIYEV ELSEVAR NABI
PhD Candidate, Azerbaijan State Oil and
Industry University, Baku, Azerbaijan
E-mail: mr_allahverdiyev@mail.ru

АЛЛАХВЕРДИЄВ Е. Н.

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан
АЛГОРИТМ ВИБОРУ ВИТРАТОМІРУ З ОПТИМАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Проблеми. У багатьох випадках виникає проблема вибору з безлічі альтернатив засобів вимірювальної техніки, необхідних для вимірювання параметрів технологічного процесу. Тому вимірювальні прилади з різними конструкціями, принципами роботи та різними техніко-технологічними параметрами випускаються різними виробниками. Однією з важливих проблем при розробці цих систем є вибір засобів вимірювальної техніки з оптимальними експлуатаційними та метрологічними характеристиками відповідно до технічних умов виробника та технічного завдання на проектування системи.

Методика. Прийняття рішень за кількома критеріями використовуються для вирішення проблем, пов'язаних з кількома критеріями. Датчики високої точності забезпечують точні показання, хоча в процесі вимірювання беруть участь кілька параметрів: швидкість потоку; газ або використані гази; температура; робочий тиск; перепад тиску; ціна; точність; час реакції; час розігріву; вибрано стабільний діапазон вимірювання (зниження) газу.

Результати. Розглянуто процес вибору оптимального витратоміра газу для інформаційно-вимірювальної системи. Досліджено критерії вибору витратомірів, показано, що процес відбору є багатокритеріальним завданням. Запропоновано алгоритм вибору витратоміра газу. Запропонований алгоритм на основі методу АНР та TOPSIS. Ідея алгоритму наступна. Спочатку експерти вибирають кілька альтернатив, які відповідають усім вимогам до витратомірів різних постачальників. На наступному кроці розраховуються відносні критерії важливості. Після цього формуються матриці рішень, за якими визначаються переваги до цілей.

Наукова новизна. Краща альтернатива або витратомір з оптимальними параметрами визначається ранжуванням усіх альтернатив.

Практична значимість. Застосування запропонованого алгоритму підвищує надійність остаточного рішення та автоматизує процес відбору за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Ключові слова: витратомір газу; алгоритм вибору; багатокритеріальний; прийняття рішення.

АЛЛАХВЕРДИЕВ Е. Н.

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

АЛГОРИТМ ПОДБОРА РАСХОДОМЕРА С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Проблемы. Во многих случаях возникает проблема выбора из множества альтернатив средств измерений, необходимых для измерения параметров технологического процесса. Так как средства измерений с различной конструкцией, принципом действия и разными технико-технологическими параметрами выпускаются разными производителями. Одной из важных проблем при разработке этих систем является выбор средств измерений с оптимальными эксплуатационными и метрологическими характеристиками в соответствии с техническими условиями производителя и техническим заданием на проектирование системы.

Методика. Принятие решений по нескольким критериям используется для решения проблем, связанных с несколькими критериями. Датчики высокой точности обеспечивают точные показания, хотя в процессе измерения участвуют несколько параметров: скорость потока; используемый газ или газы; температура; рабочее давление; падение давления; цена; точность; время отклика; время прогрева; выбран стабильный диапазон измерения (диапазон) газа.

Результаты. Рассмотрен процесс выбора оптимального расходомера газа для информационно-измерительной системы. Изучены критерии выбора расходомеров, показано, что процесс выбора является многокритериальной задачей. Предложен алгоритм выбора расходомера газа. Предлагаемый алгоритм основан на методе АНР и TOPSIS. Идея алгоритма следующая. Первоначально специалисты отбирают несколько вариантов, отвечающих всем требованиям, предъявляемым к расходомерам различных поставщиков. На следующем шаге рассчитываются относительные критерии важности. После этого составляются матрицы решений, по которым определяются предпочтения по целям.

Научная новизна. Лучшая альтернатива или расходомер с оптимальными параметрами определяется ранжированием всех альтернатив.

Практическая значимость. Применение предложенного алгоритма повышает достоверность окончательного решения и автоматизирует процесс выбора за счет использования соответствующего программного обеспечения.

Ключевые слова: расходомер газа, алгоритм выбора, многокритериальность, принятие решения.

УДК 677.055

ДВОРЖАК В. М., МАНОЙЛЕНКО О. П.,
КРИКУН С. С., КЛІННІКОВ А. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ВІДТВОРЕННЯ ФУНКЦІЇ ПОЛОЖЕННЯ МЕХАНІЗМОМ ТРЕТЬОГО КЛАСУ ДЛЯ КОЛИВАЛЬНОГО РУХУ ВУШКОВИХ ГОЛОК ОСНОВОВ'ЯЗальної МАШИНИ

Мета. Вдосконалення методів розрахунку та дослідження цільових механізмів машин для індустрії моди з використанням прикладних CAD-програм.

Методика. Використані апарат векторної алгебри; метод векторного перетворення координат для кінематичного розрахунку плоских механізмів зі структурними групами третього класу; аналітичний метод диференціювання для визначення похибки положення механізму третього класу з оберतालними кінематичними парами.

Результати. Отримані розрахункові вирази для визначення функції положення вушкових голок, визначені первинні похибки механізму, а також похибки положення, викликані безпосередньо первинними похибками механізму вушкових голок основов'язальної машини, який побудований на базі багатоланкового плоского механізму зі структурними групами 3-го класу 3-го порядку з оберतालними кінематичними парами, у функції кута повороту ведучого кривошипа. Визначені граничні значення похибок положення $\Delta_{\max}$ та $\Delta_{\min}$ гребінки з вушковими голками у проекціях на осі координат та за абсолютною величиною.

Наукова новизна. Виконаний порівняльний аналіз точності відтворення функції положення синтезованим шестиланковим механізмом третього класу та базовим восьмиланковим механізмом другого класу основов'язальної машини, у результаті якого встановлено, що синтезований механізм точніше відтворює функцію положення, ніж базовий механізм.

Практична значимість. Запропонований порядок розрахунку на точність синтезованого шестиланкового механізму 3-го класу з оберतालними кінематичними парами диференціальним методом для автоматизованого комп'ютерного розрахунку в CAD-програмах. Створені програмні блоки для автоматизованого комп'ютерного розрахунку на точність в Mathcad. Отримані результати можуть бути використані для моделювання, розрахунку та конструювання багатоланкових плоских механізмів зі структурними групами 3-го класу 3-го порядку з оберतालними кінематичними парами та подібних цільових важільних механізмів вищих класів машин для індустрії моди.

Ключові слова: основов'язальна машина; точність механізму; механізм 3-го класу; механізм вушкових голок.

Вступ. Одним з факторів, який визначає якість готової продукції, є точність її виробництва. Аналізування причин виникнення похибок виробництва дозволяє встановити допуск на ці похибки. На точність виготовлення трикотажних виробів безпосередньо впливає точність виготовлення цільових механізмів технологічних машин [1]. Характерною особливістю цільових механізмів основов'язальних машин є забезпечення доволі незначних переміщень робочим органам за складними законами руху із зупинками під час процесу петлетворення, які реалізуються багатоланковими шарнірно-важільними механізмами. Розрахунок на точність таких механізмів має впливати з умови забезпечення потрібного технологічного допуску на здійснення процесу петлетворення, тобто для забезпечення одночасного руху всіх робочих органів від цільових механізмів, які працюють у паралельній схемі [2].

Рациональний розподіл первинних похибок ланок цільових механізмів дозволить знизити витрати на дизайн та виробництво основов'язальних машин і в кінцевому випадку витрати на виготовлення основов'язаних полотен.

Постановка завдання. Дослідженню точності механізмів присвячено багато робіт, зокрема роботи Н. Г. Бруєвича [3, 4], Н. А. Калашникова [5], В. І. Сергєєва [6],

Н. Е. Кобринського [7], В. В. Сторожева [8, 9, 10], Ж. Усенбекова [11] та інших науковців. Розрахунок на точність виконують на всіх етапах створення машин, починаючи з проєктування і завершуючи випробовуванням дослідних зразків. При проведенні розрахунку на точність важливого механізму визначають або похибку веденої ланки за допустимими похибками його ланок, або розподілення за ланками заданої сумарної похибки веденої ланки. У зв'язку з чим, виділяють дві задачі аналізу точності: пряму, коли за заданими геометричними похибками визначають функції положення, і обернену, коли за заданою точністю відтвореної функції положення визначають допустимі відхилення розмірів ланок [1].

З практики відомо, що всі розміри ланок механізмів мають деякі відхилення від заданих розмірів. Це пов'язують з похибками виготовлення, складання, монтажу деталей та складальних одиниць, з пружними, температурними та іншими видами деформацій деталей, з похибками вимірювання тощо [1, 8, 9].

У цій роботі дослідимо точність механізму третього класу для коливального руху вушкових голок (рис. 1), метричні параметри якого були визначені в роботі [12]. У цьому механізмі розміри ланок відрізняються від номінальних розмірів і ця різниця складає так звану геометричну похибку, тобто визначає первинні похибки. Прийmemo такі допущення, що первинні похибки та похибки механізму є малими; первинні похибки є незалежними. Для аналізування точності механізму визначимо похибку положення, яка є різницею між положеннями точного (ідеального) і неточного (реального) механізмів.

Первинні похибки задаємо у вигляді допустимих відхилень розмірів ланок механізму. Похибки механізму визначимо аналітичним методом диференціювання, який полягає в складанні математичних моделей функцій положення та в диференціюванні їх в частинних похідних за незалежними параметрами механізму [1]. Використовуючи математичні моделі функцій положення механізму, які отримані в роботі [12], визначимо частинні похідні від функцій положення та самі похибки положення. З метою автоматизації розрахунків останні виконаємо в програмі Mathcad. Для оцінювання отриманих результатів розрахунку порівняємо їх з результатами, отриманими в роботі [13] для плоского восьмиланкового механізму коливального руху вушкових голок основ'язальної машини ОВ-7.

Результати дослідження. Положення веденої ланки механізму ρ функціонально пов'язане з розмірами всіх ланок та положенням ведучих ланок і є функцією цілого ряду незалежних змінних (незалежних параметрів r_i):

$$\rho = \varphi(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n). \quad (1)$$

Характер функції φ визначається структурою та розмірами механізму.
Для ідеального механізму:

$$\rho = \varphi(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n). \quad (2)$$

У дійсного механізму незалежні параметри r_n будуть відрізнятися від відповідних незалежних параметрів ідеального механізму r_{n0} на величину первинної похибки Δr_n :

$$\rho = \varphi(r_1, r_2, r_3, \dots, r_n) = \varphi([r_{10} + \Delta r_1], [r_{20} + \Delta r_2], [r_{30} + \Delta r_3], \dots, [r_{n0} + \Delta r_n]). \quad (3)$$

Для геометричних розмірів ланок механізму значення первинних похибок Δr_n повинні вкладатися в поле допусків. Це дозволяє вираз (3) розкласти в ряд Тейлора з урахуванням двох перших членів розкладу ряду [13]:

$$\rho \approx \varphi(r_{10}, r_{20}, r_{30}, \dots, r_{n0}) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \right)_0 \Delta r_i, \quad (4)$$

де $\varphi(r_{10}, r_{20}, r_{30}, \dots, r_{n0})$ – функція положення веденої ланки для механізму, що має рівняння дійсного механізму, але розміри ланок ідеального механізму;

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \right)_0 \Delta r_i = \Delta \rho_i \quad - \text{похибка механізму, яка викликана безпосередньо однією}$$

первинною похибкою та визначається добутком первинної похибки на частинну похідну від функції переміщення веденої ланки – коромисла 5 з робочою точкою P_8 (рис. 1) (згідно з рівнянням реального механізму), що взята по незалежному параметру для механізму, що розраховується. Кількість частинних похідних є такою, якою є кількість незалежних параметрів n у механізмі.

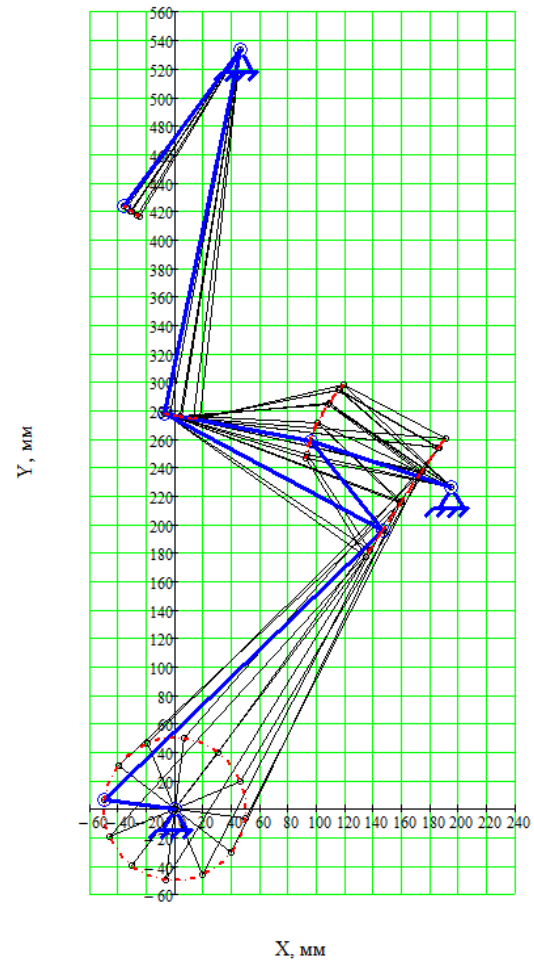
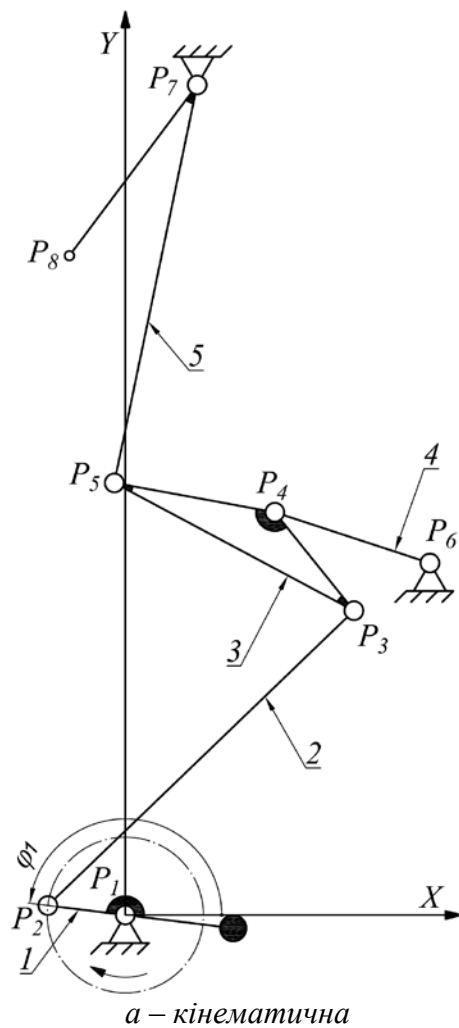


Рис. 1. Схеми шестиланкового плоского механізму зі структурними групами 3-го класу 3-го порядку за Ассуром для коливання вушкових голок основ'язальної машини

Похибку положення механізму в загальному вигляді визначатимемо за виразом [13]:

$$\Delta = \rho - \rho_0 = \Delta \rho = \varphi(r_{10}, r_{20}, r_{30}, \dots, r_{n0}) - \varphi_0(r_{10}, r_{20}, r_{30}, \dots, r_{n0}) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \right)_0 \Delta r_i. \quad (5)$$

Оскільки функція положення механізму зберігає вигляд при допустимому відхиленні незалежних параметрів реального механізму від відповідних незалежних параметрів ідеального механізму [13], то $\varphi = \varphi_0$ і рівність (5) можна записати таким чином:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r_i} \right)_0 \Delta r_i = \sum_{i=1}^n \Delta r_i. \quad (6)$$

Для плоского шестиланкового механізму третього класу функція положення робочої точки P_8 (рис. 1) – вушка вушкової голки, залежить від кута повороту ведучого кривошипа φ_1 та 13 незалежних параметрів $l_{1-2}, l_{2-3}, l_{3-4}, l_{4-5}, l_{3-5}, l_{4-6}, l_{5-7}, l_{7-8}, U_{5-7-8}, X_6, Y_6, X_7, Y_7$ та описується виразом [12]:

$$P_8(u) = \begin{bmatrix} P_{7x} \\ P_{7y} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{7-5}(u)_x \cdot \cos(U_{5-7-8}) - P_{7-5}(u)_y \cdot \sin(U_{5-7-8}) \\ P_{7-5}(u)_x \cdot \sin(U_{5-7-8}) + P_{7-5}(u)_y \cdot \cos(U_{5-7-8}) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{l_{7-8}}{l_{7-5}}, \quad (7)$$

де $u = (\varphi_1, l_{1-2}, l_{2-3}, l_{3-4}, l_{4-5}, l_{3-5}, l_{4-6}, l_{5-7}, l_{7-8}, U_{5-7-8}, X_6, Y_6, X_7, Y_7)$.

Вектор коромисла P_{7-5} визначаємо з виразів:

$$P_{7-5}(u) = \begin{bmatrix} l_{1-2} \cdot \cos(u) + l_{2-3} \cdot \cos(\varphi_{2-3}(u)) \\ l_{1-2} \cdot \sin(u) + l_{2-3} \cdot \sin(\varphi_{2-3}(u)) \\ 0 \end{bmatrix} + P_{3-5}(u) - P_7; \quad (8)$$

$$P_{3-5}(u) = \begin{bmatrix} l_{3-4} \cdot \cos(\varphi_{3-4}(u)) \cdot (\cos(U_{4-3-5}) - \sin(U_{4-3-5})) \\ l_{3-4} \cdot \sin(\varphi_{3-4}(u)) \cdot (\sin(U_{4-3-5}) + \cos(U_{4-3-5})) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{l_{3-5}}{l_{3-4}}, \quad (9)$$

де φ_{2-3} та φ_{3-4} – кути відповідних ланок: шатуна 2 та шатуна 3, які визначаються в роботі [12] методом чисельного розв'язку системи векторних рівнянь замкнутості векторних контурів за кінематичною схемою механізму;

U_{4-3-5} – кут, який визначає взаємне розміщення плеч шатуна 3: 3_4 та 3_5 .

Отже, використовуючи вираз (6), складемо вираз для визначення похибки положення вушкової голки механізму:

$$\begin{aligned} \Delta = \sum_{i=1}^{13} \Delta \rho_i = & \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{1-2}} \right)_0 \Delta l_{1-2} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{2-3}} \right)_0 \Delta l_{2-3} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{3-4}} \right)_0 \Delta l_{3-4} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{4-5}} \right)_0 \Delta l_{4-5} + \\ & + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{3-5}} \right)_0 \Delta l_{3-5} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{4-6}} \right)_0 \Delta l_{4-6} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{5-7}} \right)_0 \Delta l_{5-7} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial l_{7-8}} \right)_0 \Delta l_{7-8} + \\ & + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial U_{5-7-8}} \right)_0 \Delta U_{5-7-8} + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial X_6} \right)_0 \Delta X_6 + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial Y_6} \right)_0 \Delta Y_6 + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial X_7} \right)_0 \Delta X_7 + \left(\frac{\partial P_8(u)}{\partial Y_7} \right)_0 \Delta Y_7. \end{aligned} \quad (10)$$

Значення первинних похибок геометричних параметрів механізму були визначені за симетричним допуском 7-го квалітету ($\pm IT7/2$) [14]. Допуск кута U_{4-3-5} установки гребінки при відстані $l_{7-8} = 136,8$ мм між віссю колювання вала з гребінкою та вушка вушкової голки

прийнятий таким, що дорівнює $\Delta U_{4_3_5} = \pm 30''$. При дослідженні механізму на точність за початкове положення головного вала взяте таке, при якому починається рух вперед гребінок з вушковими голками після завершення зупинення за спинками крючкових голок (початковий кут ведучого кривошипа становить $\varphi_0 = 173^\circ$). Значення вхідних параметрів механізму разом зі значеннями первинних похибок представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні значення геометричних параметрів та первинних похибок механізму

Параметри механізму		Первинні похибки	
Позначення	Значення, мм	Позначення	Значення, мкм
l_{1_2}	50	Δl_{1_2}	± 12
l_{2_3}	272,5	Δl_{2_3}	± 26
l_{3_4}	81	Δl_{3_4}	± 17
l_{4_5}	104,5	Δl_{4_5}	± 17
l_{3_5}	174	Δl_{3_5}	± 20
l_{4_6}	104,5	Δl_{4_6}	± 17
l_{5_7}	261	Δl_{5_7}	± 26
l_{7_8}	136,8	Δl_{7_8}	± 20
$U_{5_7_8}$	-25°	$\Delta U_{5_7_8}$	$\pm 1/120^\circ$
X_6	195	ΔX_6	± 23
Y_6	226	ΔY_6	± 23
X_7	46	ΔX_7	± 12
Y_7	533	ΔY_7	± 35

За результатами розрахунку отримані значення похибок $\Delta \rho_i$ положення механізму, що викликані безпосередньо кожною з первинних похибок, та значення похибки положення Δ у функції кута повороту ведучого кривошипа за 13-ма незалежними параметрами, а також граничні значення похибок положення $\Delta_{\max}$ та $\Delta_{\min}$ гребінки з вушковими голками у проекціях на осі координат та за абсолютною величиною (рис. 2, рис. 3).

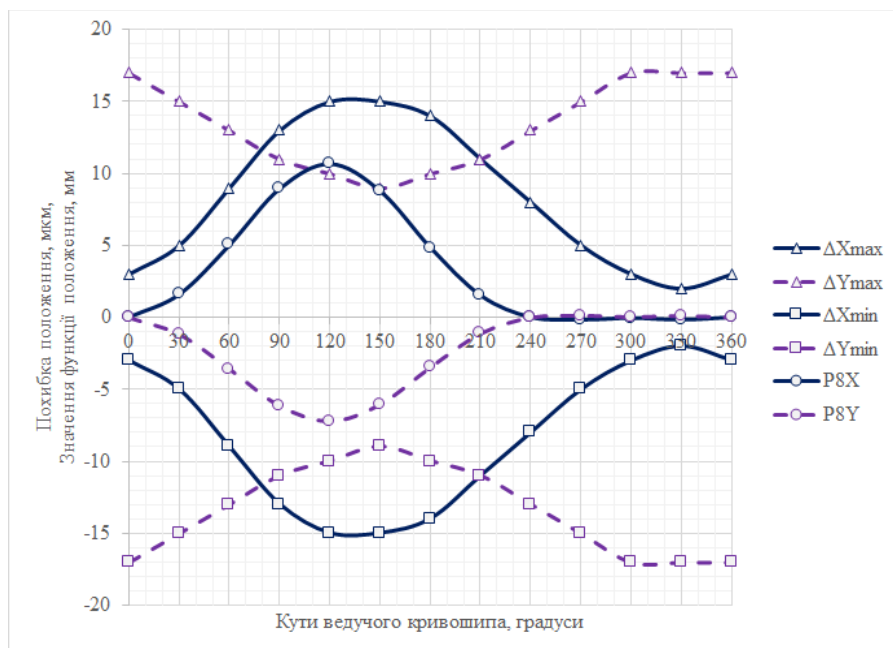


Рис. 2. Графіки значень похибки положення механізму в проекціях на координатні осі, суміщені з функцією положення робочої точки P8 в проекціях на координатні осі

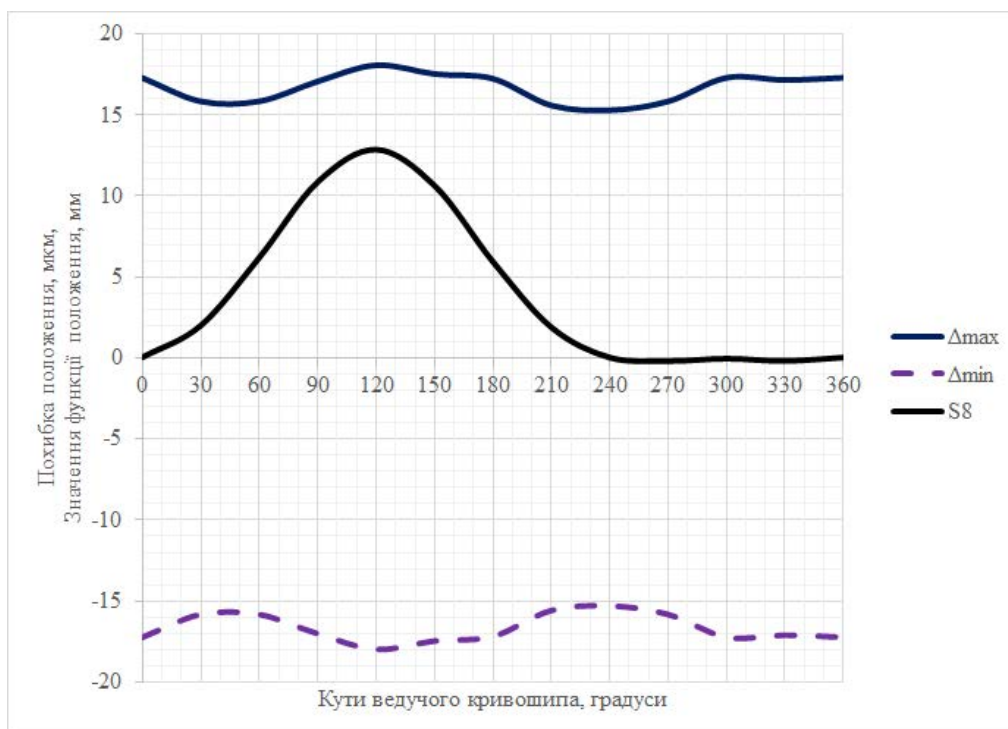


Рис. 3. Графіки абсолютних граничних значень похибки положення механізму, суміщені з функцією переміщення робочої точки S_8

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільша похибка положення складає $\Delta \approx \pm 18$ мкм. Це відбувається на етапі прокладання ниток основи, коли вушкові голки здійснюють зсув перед крючковими голками. При цьому, отримане максимальне значення похибки положення більше ніж у 3 рази менше, ніж у роботі [13]. Отже, можна вважати, що синтезований шестиланковий механізм на базі механізму третього класу точніше відтворює закон руху робочих органів ніж восьмиланковий механізм базової основов'язальної машини ОВ-7.

Висновки. Визначені первинні похибки плоского шестиланкового механізму 3-го класу для коливання вушкових голок основов'язальної машини. Визначені значення похибок положення механізму, що викликані безпосередньо кожною з первинних похибок, та значення похибки положення у функції кута повороту ведучого кривошипа за диференціальним методом з використанням програми Mathcad. На основі аналізу отриманих результатів зроблений висновок про те, що закон руху робочих органів синтезованого шестиланкового механізму третього класу реалізується у три рази точніше ніж закон руху восьмиланкового механізму базової основов'язальної машини ОВ-7.

Результати можуть використовуватись для розрахунків раціональних допусків ланок механізмів при забезпеченні найменшої собівартості та оптимального терміну служби механізму.

References

1. Kimori, I. J. (2008) Issledovanie osnovnykh mekhanizmov shvejnoj mashiny na baze sinteza tochnosti [Study of basic sewing machines based on high precision synthesis]. Moscow. 145 p. [in Russian].
2. Dvorzhak, V. M. (2008) Udoshkonalennia ta syntez mekhanizmu prokachky vushkovykh holok

Література

1. Кимори Й. Д. Исследование основных механизмов швейной машины на базе синтеза точности: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008. 145 с.
2. Дворжак В. М. Удосконалення та синтез механізму проочки вушкових голок

- osnovoviazalnykh mashyn [Improvement and synthesis of the mechanism of oscillation eyelets of basic knitting machines]. Kyiv. 260 p. [in Ukrainian].
3. Bruevich, N. G. (1946). Tochnost mekhanizmov [Mechanism accuracy]. Moscow; Leningrad: GITTL [in Russian].
 4. Bruevich, N. G., Sergeev, V. I. (1976). Osnovy nelinejnoj teorii tochnosti i nadezhnosti ustrojstv [Fundamentals of the nonlinear theory of accuracy and reliability of devices]. Moscow: Nauka. 136 p. [in Russian].
 5. Kalashnikov, N. A. (1950). Tochnost v mashinostroenii i ee zakony [Precision in mechanical engineering and its laws]. Moscow: Mashgiz. 148 p. [in Russian].
 6. Sergeev, V. I. (1971). Instrumentalnaya tochnost kinemateskikh i dinamicheskikh sistem [Instrumental accuracy of kinematic and dynamic systems]. Moscow: Nauka [in Russian].
 7. Kobrinskii, N. E. (1946). Kinemateskie oshibki ploskikh mekhanizmov, vyzyvaemykh zazorami v kinemateskikh parakh [Kinematic errors of planar mechanisms caused by gaps in kinematic pairs]. Moscow: Izvestia AN [in Russian].
 8. Storozhev, V. V. (1973). Ocenka tochnosti mekhanizmov peremeshcheniya obrabatyvaemykh detalej. [Assessment of the accuracy of mechanisms for moving workpieces]. *Izvestia vuzov*. TLP, 6: 34–36 [in Russian].
 9. Storozhev, V. V., Komysarov, A. Y. (1974). Ocenka tochnosti mekhanizmov peremeshcheniya obrabatyvaemykh detalej. Soobshchenie 2. [Assessment of the accuracy of mechanisms for moving workpieces. Message 2]. *Izvestia vuzov*. TLP, 3: 54–56 [in Russian].
 10. Zakaraia, M. M., Gusarov, V. V. and Storozhev, V. V. (1990). Analiz strukturnykh oshibok v mekhanizмах peremeshcheniya materiala mashin besposadochnogo shva [Analysis of Structural Errors in the Material Movement Mechanisms of Non-Stop Weld Machines]. *Collection of scientific papers TsNIEEIllegprom*. P. 109–114 [in Russian].
 11. Usenbekov, Zh. (1977) Issledovanie tochnosti vypolneniya operacij na shvejnykh mashinakh s uchyotom pozicionirovaniya obekta obrabotki [Study of the accuracy of performing operations on sewing machines, taking into account the positioning of the processing object]. Moscow. 169 p. [in Russian].
 12. Dvorzhak, V. M., Chudinovich, Yu. Yu., Chmykhalo, S. H. (2017). Rozrobka i doslidzhennia mekhanizmu kolyvalnoho rukhu vushkovykh holok dla osnovoviazalnoi mashyny [Design and study of the mechanism of oscillatory movement of ear needles for the knitting machine]. *Tekhnolohiyi ta dyzayn*, No. 3. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_3_14 [in Ukrainian].
 13. Orlovski, B. V., Dvorzhak, V. M. (2006). Rozrakhunok na tochnist tipovoho vosmylankovoho mekhanizmu osnovov'язальних машин: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2008. 260 с.
 3. Бруевич Н. Г. Точность механизмов. М.; Л.: ГИТТЛ, 1946.
 4. Бруевич Н. Г., Сергеев В. И. Основы нелинейной теории точности и надежности устройств. М.: Наука, 1976. 136 с.
 5. Калашников Н. А. Точность в машиностроении и ее законы. М.: Mashgiz, 1950. 148 с.
 6. Сергеев В. И. Инструментальная точность кинематических и динамических систем. М.: Наука, 1971.
 7. Кобринский Н. Е. Кинематические ошибки плоских механизмов, вызываемых зазорами в кинематических парах. *Известия АН СССР, ОТН*. 1946.
 8. Сторожев В. В. Оценка точности механизмов перемещения обрабатываемых деталей. *Известия вузов. ТЛП*. 1973. № 6. С. 34–36.
 9. Сторожев В. В., Комиссаров А. И. Оценка точности механизма перемещения обрабатываемых деталей. Сообщение 2. *Известия вузов. ТЛП*. 1974. № 3. С. 54–56.
 10. Закарая М. М., Гусаров А. В., Сторожев В. В. Анализ структурных ошибок в механизмах перемещения материала машин беспосадочного шва. *Сб. научных трудов ЦНИИЭИлегпром*, 1990. С. 109–114.
 11. Усенбеков Ж. Исследование точности выполнения операций на швейных машинах с учётом позиционирования объекта обработки: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1977. 169 с.
 12. Дворжак В. М., Чудінович Ю. Ю., Чмихало С. Г. Розробка і дослідження механізму коливального руху вушкових голок для основов'язальної машини. *Технології та дизайн*. 2017. № 3. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_3_14.
 13. Орловський Б. В., Дворжак В. М. Розрахунок на точність типового

prokachky vushkovykh holok osnovoviazalnoi mashyny [Calculation of the accuracy of a typical eight-link mechanism for pumping the eyelets of the warp knitting machine]. *Problemy legkoj i tekstilnoj promyshlennosti Ukrainy* = *Problems of light and textile industry of Ukraine*, 2: 70–72 [in Ukrainian].

14. Anuriev, V. I. (1980). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya*. T. 1 [Handbook of the designer-machine builder. Vol. 1]. Moscow: Mashinostroenie. 728 p. [in Russian].

восьмиланкового механізму прокачки вушкових голок основов'язальної машини. *Проблеми легкої і текстильної промисловості України*. 2006. № 2. С. 70–72.

14. Анурьев В. И. *Справочник конструктора-машиностроителя*. Т. 1. М.: Машиностроение, 1980. 728 с.

DVORZHAK VOLODYMYR

Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Machines,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1693-9106>
Researcher ID: P-5907-2018
E-mail: dvorzhak.vm@knutd.edu.ua

KRYKUN YEVHENII

Student, Department of Applied Mechanics and Machines,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: asda19898@gmail.com

MANOILENKO OLEKSANDR

Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Machines,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5670-4977>
E-mail: manoilenko.op@knutd.edu.ua

KLINNIKOV ANTON

Student, Department of Applied Mechanics and Machines, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: derto662@gmail.com

ДВОРЖАК В. М., МАНОЙЛЕНКО О. П., КРИКУН Е. С., КЛИННИКОВ А. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ФУНКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ
МЕХАНИЗМОМ ТРЕТЬЕГО КЛАССА ДЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
УШКОВЫХ ИГЛ ОСНОВОВЯЗАЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Цель. Совершенствование методов расчета и исследования целевых механизмов машин для индустрии моды с использованием прикладных CAD-программ.

Методика. Применены аппарат векторной алгебры; метод векторного преобразования координат для кинематического расчета плоских механизмов со структурными группами третьего класса; аналитический метод дифференцирования для определения погрешности положения механизма третьего класса с вращательными кинематическими парами.

Результаты. Получены расчетные выражения для определения функции положения ушковых игл, определены первичные ошибки механизма, а также ошибки положения, вызванные непосредственно первичными ошибками механизма ушковых игл основовязательной машины, построенного на базе многосвязного плоского механизма со структурными группами 3-го класса 3-го порядка с вращательными кинематическими парами в функции угла поворота ведущего кривошипа. Определены предельные значения ошибок положения $\Delta_{\max}$ и $\Delta_{\min}$ гребенки с иглами в проекциях на оси координат и по абсолютной величине.

Научная новизна. Проведен сравнительный анализ точности воспроизведения функции положения синтезированным шестизвенным механизмом третьего класса и базовым восьмизвенным механизмом второго класса основовязательной машины, в результате которого установлено, что синтезированный механизм точнее воспроизводит функцию положения, чем базовый механизм.

Практическая значимость. Предложен порядок расчета на точность синтезированного шестизвенного механизма 3-го класса с вращательными кинематическими парами

дифференциальным методом для автоматизированного компьютерного расчета в CAD-программах. Созданы программные блоки для автоматизированного компьютерного расчета на точность в Mathcad. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования, расчета и конструирования многозвенных плоских механизмов со структурными группами 3-го класса 3-го порядка с вращательными кинематическими парами и подобных целевых рычажных механизмов высших классов машин для индустрии моды.

Ключевые слова: основовазальная машина; точность механизма; механизм 3-го класса; механизм ушковых игл.

DVORZHAK V. M., MANOILENKO O. P., KRYKUN Ye. S., KLINNIKOV A. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF REPRODUCING THE POSITION FUNCTION BY THE MECHANISM OF THE THIRD CLASS FOR THE OSCILLATIONAL MOVEMENT OF THE EYE NEEDLE OF THE BOND KNITTING MACHINE

Purpose. Improving methods of calculation and research of target mechanisms of machines for the fashion industry using CAD applications.

Methodology. Used the apparatus of vector algebra; method of vector transformation of coordinates for kinematic calculation of plane mechanisms with structural groups of the third class; analytical method of differentiation to determine the position error of the third class mechanism with rotating kinematic pairs.

Findings. The calculated expressions for determining the function of the position of the eyelets, the primary errors of the mechanism, as well as positional errors caused directly by the primary errors of the mechanism of the eyelets of the warp knitting machine, which is built on a multi-link flat mechanism with structural groups with rotating kinematic pairs, as a function of the angle of rotation of the drive crank. The error limits of the position Δ_{max} and Δ_{min} of the comb with eye needles in the projections on the coordinate axis and in absolute value are determined.

Originality. A comparative analysis of the accuracy of the position function reproduction was performed by the synthesized six-link mechanism of the third class and the basic eight-link mechanism of the second class of the warp knitting machine.

Practical Value. The procedure for calculating the accuracy of the synthesized six-link mechanism of the 3rd class with rotating kinematic pairs by the differential method for automated computer calculation in CAD programs is proposed. Software blocks for automated computer accuracy calculation in Mathcad have been created. The obtained results can be used for modeling, calculation and construction of multi-link flat mechanisms with structural groups of the 3rd class of the 3rd order with rotating kinematic pairs and similar target lever mechanisms of higher classes of machines for the fashion industry.

Keywords: basic knitting machine; precision mechanism; 3rd class mechanism; eye needle mechanism.

УДК 621.865.8:
687.053

ОРЛОВСЬКИЙ Б. В., МІСЯЦЬ М. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНО-АДЕКВАТНИХ ЗАХВАТІВ МАНІПУЛЯТОРІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШВЕЙНИХ МАШИН ДЕТАЛЯМИ КРОЮ З ТЕКСТИЛЮ

Мета. Метою даного дослідження є розробка методу параметричного порівняльного аналізу функціонально адекватних захватів маніпуляторів для завантаження швейних машин деталями крою з текстилю.

Методика. Застосовано методику кореляційно-регресійного аналізу та експертні оцінки, що дозволяють кількісно обґрунтувати прийняття раціональних рішень на стадії проектування при розробці технічної пропозиції. Статистичний аналіз дозволяє уникнути жорстких вимог, що висуваються до системи переваг експертів у методі направленого вектора, що є аналогом статистичної моделі і має ряд переваг у порівнянні з широко відомим методом апіорного ранжування факторів.

Результати. Для порівняльного аналізу функціонально адекватних захоплень текстильних деталей крою модулів швейних маніпуляторів запропоновано узагальнений показник якості процесу поштучного відокремлення частин деталей від пачки залежно від кількох параметрів. Послідовне виключення несуттєвих параметрів та реструктуризація математичних моделей спростили моделі, в яких найважливіші параметри були залишені для розробки модулів захоплення маніпуляторів для роботизованого шиття та автоматизації швейних машин.

Наукова новизна. Виявлено основні закономірності та побудовано математичні моделі для запропонованого узагальненого показника якості процесу поштучного відділення деталей крою з текстилю від пачки залежно від кількох параметрів.

Практична значимість. Розроблено метод параметричного порівняльного аналізу функціонально адекватних захватів маніпуляторів для автоматичного завантаження швейних машин загального призначення деталями крою з текстилю.

Ключові слова: захоплення; модулі; швейний маніпулятор; К-моделі; деталі крою з текстилю.

Вступ. Проблема автоматизованого завантаження машин легкої промисловості на прикладах взуттєвих машин вивчалася на роботах професора Г.А. Піскорського [1] тайогоучнів [3–21]. Показано, що об'єднання в єдиному технологічному циклі магазинного завантажувального пристрою (МЗП) та технологічної машини утворюється робото-технологічний комплекс (РТК) цільового призначення. При цьому відбувається автоматичне переміщення орієнтованими в площині жорстких та повітря-непроникних деталей до робочих органів машин для виготовлення взуття. Питання об'єктно-орієнтованого проектування МОЗ з цикловою системою управління для взуттєвого технологічного обладнання розглянуті в роботі [2]. Матеріали, процеси та технологічне обладнання для виготовлення одягу з текстилю суттєво відрізняються від матеріалів та обладнання для виготовлення взуття. Практика показала економічну надмірність застосування промислових роботів (ПР) для автоматизації машин легкої промисловості. Але актуальною залишається проблема розробки технологічних модулів для захоплення текстильних деталей крою з пачки для створення РТК на основі автоматизованих швейних машин. Деталі з текстилю відносяться до плоских повітря-проникливих об'єктів маніпулювання, що мають малу масу (до 0,3–0,4 кг/м²) та підвищену деформованість при маніпулюванні.

Аналіз попередніх досліджень. Для виробів з текстилю в роботах [22–25] на основі ПР ведеться пошук застосування мехатронних систем для визначення потенційно прийнятних точок маніпулювання із забезпеченням зворотного зв'язку з модулем захоплення матеріалів, що легко деформуються, таких як тканини. Для цього ПР оснащуються складними системами

технічного зору та штучного інтелекту для попереднього розпізнавання зім'ятих ділянок таких матеріалів для подальшого їх маніпулювання із застосуванням різних візуальних сенсорів. ПР використовують механічні 3х-пальцеві захвати з декількома ступенями рухливості та виконують програмні переміщення у просторі окремих ділянок або виробу з текстилю. Застосування таких ПР замість швейних маніпуляторів для автоматичного завантаження кожної швейної машини є економічно недоцільним.

Постановка завдання. Спочатку потрібнорозглянути етапи і топологію взаємодії пари «захват маніпулятора – деталь крою з текстилю» для поштучного відокремлення текстильних деталей та розкрити механізм процесу поштучного відокремлення текстильних деталей крою з МЗП. Основною задачею роботи є розробка методу параметричного порівнювального аналізу захватів технологічних модулів для створення робото-технологічних комплексів на основі автоматизованих швейних машин загального призначення. Результатом такого аналізу є побудова математичної моделі для з раціональною кількістюзначимих для проектування кількісних та якісних параметрів. Для порівнювального аналізу математичних моделей запропонувати узагальнений показник якості процесу відділення частин деталей від пачки в залежності від декількох параметрів. Побудувати математичні моделі множинної лінійної регресії для запропонованого узагальненого показника якості K_j захватів швейних маніпуляторів різної конструкції і принципу дії. Провести аналіз кількісних і якісних співвідношень між параметрами в математичних моделях і їх впливу на узагальнений показник якості

Результати досліджень. Для поштучного відокремлення текстильних деталей крою з МЗП, матеріал яких є діелектриком, неможливо використання магнітних захватів. З механічних та пневматичних захватів відомі різні контактні захвати для маніпуляторів з голками, цангами, кардолентами, липучками, пневматичними присмоктувачами та іншими робочими інструментами. При застосуванні контактних захватів відбувається механічне або пневматичне проникнення робочого інструменту або робочого середовища в ниткову пористу структуру деталі та захопленням та деформацією окремих ділянок деталі з текстилю. Недоліком таких захватів є деформація деталі та зміна її плоскої форми у об'ємну, а потім зворотне повернення з об'ємної форми у плоску. Для зменшення зміни плоскої форми деталі топологія точок захвату потребує використання багато інструментальних робочих органів захватів та їх реверсом в робочій зоні голки швейної машини для повернення зміненої форми деталі у плоску форму або попереднє закріплення деталі у п'яльцях.

Початковим етапом проектування та моделювання робото технологічних комплексів цільового призначення є розкриття механізму процесу поштучного відокремлення текстильних деталей крою з МЗП з наступним обґрунтованим вибором захватів з множини функціонально-адекватних захватів деталей з текстилю.

Сили зчеплення деталей крою з текстилю у стосі завжди перевищують силу ваги деталі за рахунок проникнення та переплетення ворсу ниток між собою деталей у МЗП. Тому для гарантованого відокремлення тільки одної деталі з МЗП потрібно застосування додаткових програмних та апаратних пристроїв для поштучного відокремлення текстильних деталей крою з МЗП при автоматизованому завантаженні машин деталями крою з текстилю.

Для поштучного захвату текстильних деталей крою з МЗП обраний безконтактний захват з аеродинамічної пластиною [26], у якому робочим середовищем є розріджене вакуумне середовище, яке перекриває всю поверхню верхньої деталі робочого органу захвату, кінематичне з'єднаного з МЗП.

Для збереження плоско паралельності форми та плоско паралельного руху м'яких деталей крою при їх переміщення з позиції – точки А в позицію – точку Б по вертикалі (рис. 1) без механічної опори виникають деякі невідповідності. Для усунення невідповідності

вантажопідйомності силам зчеплення деталей крою з текстилю при поштучному їх відділенні з МЗП потрібно розкрити механізм безконтактного процесу для типових випадків перевищення сил зчеплення між м'якими деталями в стосі над силами ваги деталей з обмеженням на зміну плоскої форма.

Фізика механізму процесу маніпуляції плоскими деталями крою з текстилю зв'язаний з явищем *перколяції* (просмоктування робочого середовища скрізь пористий об'єкт) та явищем аеродинамічної тимчасової *левітації*, яка утворюється потоком газу крізь пористу тканину (сітчаста структура) в протидію силі тяжіння у режимі переміщення по вертикалі пористого об'єкта малої маси при відокремленні з МЗП.

Механізм процесу поштучного відокремлення деталей з МЗП можна розкрити з використанням пошарової ілюстрації наведеної на рис. 1, де прийняті наступні позначення:

- шар подолання бар'єру I – це авангардна дія робочого середовища (рс) на ворс (об'єкт 1 – на рис.1 позначені крапками) ниток основи та кутка верхньої поверхні деталі до її присмоктування до робочого інструменту (PI). При цьому відбувається деформація і випрямлення хаотично зігнутих ворсинок на поверхні деталі та збільшення пористості об'єкту 1;
- шар подолання бар'єру II – це дія робочого середовища (РС) на структуру переплетення ниток основи та кутка тканини (об'єкт 2 – на рис.1 позначений відрізками ліній, що утворюють сітчасту структуру) для присмоктування до робочого інструменту;
- шар подолання бар'єру III – це дія робочого середовища (РС) на тіло деталі (об'єкт 3 – на рис.1 позначений об'єднанням об'єкту 1 та об'єкту 2);
- шар подолання бар'єру IV – це послаблений стан дії робочого середовища при відсутності сил ваги відокремленої верхньої деталі після відокремлення об'єкту 3. Відбувається порушення зв'язків ворсу нижньої поверхні *i-1* деталі з ворсом верхньої поверхні *i*-ої деталі, тобто дія робочого середовища для подолання сили зчеплення ворсу між деталями.

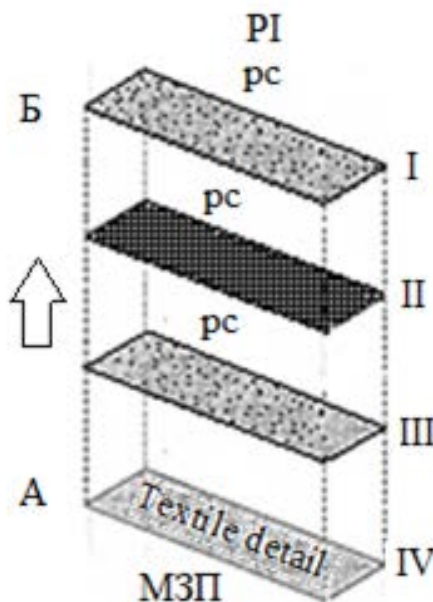


Рис. 1. Принципова схема якісного механізму процесу поштучного відокремлення деталей з МЗП: I–IV – шари подолання бар'єрів об'єктів взаємодії між собою та з робочим середовищем (рс) для утворення механіко-технологічної пари «робочий інструмент (PI) – деталь з текстилю (Textile detail)»

Таким чином, на силове поле при безконтактному аеродинамічному процесі відокремлення деталей крою з текстилю з МЗП впливає явище *перколяції* (бар'єри I та II), яке супроводжується станом левітації (бар'єр III).

Швейні машини з маніпулятором автоматичного завантаження деталями крою з текстилю переходять у клас РТК цільового призначення, якщо процес автоматизованого поштучного відділення текстильних деталей з пачки та завантаження складаються з наступних основних етапів циклу роботи швейного маніпулятора.

1 – контакт робочого інструменту або робочого середовища для захоплення верхньої ворсистості та повітропроникної поверхні «а» і-тої деталі немагнітного м'якого листового матеріалу, а саме контакт з деталлю крою;

2 – контактне або безконтактне проникнення робочого інструменту або робочого середовища всередину верхньої і-тої деталі;

3 – руйнування контакту взаємодії між нижньою ворсистістю поверхнею "в" і-тої деталі з верхньою ворсистістю поверхнею «а» і+1 деталі крою в пачці;

4 – частковий або повний поділ і-тої та і+1 деталей;

5 – переміщення і-тої деталі крою в зону голкової пластини та притискної лапки швейної машини

6 – розщеплення робочого інструменту (робочого середовища) з поверхнею «а» і-тої деталі в зоні голкової пластини та притискної лапки швейної машини для подальшої технологічної операції обметування краю на машинах типу overlock або пауза для повторення пунктів 1 ... 6 наступного циклу з деталлю і + 1 на машинах типу lockstitch.

Таким чином, етапи 1–6 циклу впливають із механізму процесу поштучного відділення деталей із пачки, як це показано на рис. 1.

Для спрощення вирішення науково-технічного завдання поштучного відділення плоских текстильних деталей з пачки та подальшого переміщення їх у робочу зону голкової пластини та притискної лапки швейної машини далі розглянуто топологію контакту для пари «захоплення швейного маніпулятора – деталь» для вибору раціонального захвату. При цьому слід підкреслити, що швейний маніпулятор працює з деталями, вирізаними з текстильного настилу, що утворюють пачку. Деталі в пачці розташовані паралельно поверхні, на якій розміщена пачка, а пом'ятості у вигляді вигнутих ділянок тканини не передбачені. Запропоноване для такого процесу захоплення деталей крою з текстилю не вимагатиме застосування складних засобів технічного зору для визначення глибини складок і пом'ятостей тканини або виробу з текстилю.

Потенційно можливі варіанти контакту робочих інструментів (робочого середовища) для захоплення верхньої «а» ворсистості та повітря-проникливої поверхні і-тої деталі немагнітного м'якого листового матеріалу в пачці для автоматизованого завантаження швейних машин наведено на рис. 2.

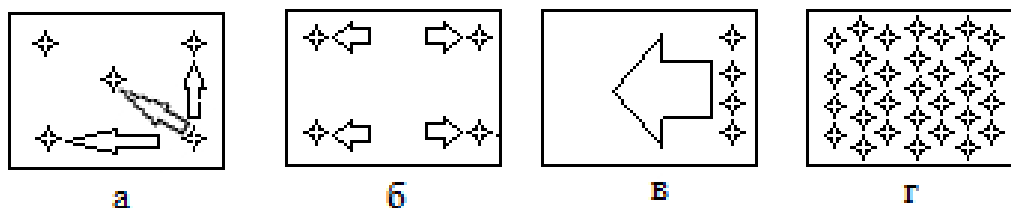


Рис. 2. Топологія контакту для пари «захоплення швейного маніпулятора – деталь»:
а – дія робочого інструменту в одній, двох або трьох точках; б – одночасну дію робочим інструментом у чотирьох точках; в – дія робочого інструменту по лінії;
г – дія робочого інструменту розподілені за площею

Для робочих інструментів механічної дії (голчастих, цангових, 3х-палих, застібки-липучки) потрібен процес розщеплення для реалізації етапу, що програмно реалізується із застосуванням додаткових технічних засобів та команд управління циклом 1–6.

Для робочих інструментів пневматичної дії (пневматичні присоски, аеродинамічна пластина) для реалізації етапу 6 задається програмована затримка (delay) подачі енергії живлення (вакууму та/або стисненого повітря) технічними засобами мехатроніки [27].

Для вибору та обґрунтування проектування раціонального робочого інструменту захватів швейного маніпулятора (**ЗШМ**) текстильних деталей крою з пачки для РТК виконано порівняльний аналіз функціонально адекватних захватів.

Для дослідження використано методику множинної лінійної кореляції для запропонованого узагальненого показника якості K_j (**УПЯ**) процесу поштучного відділення з пачки деталей крою з текстилю множини **ЗШМ**.

K_j процесу поштучного відділення з пачки деталей крою з текстилю є інтегральною оцінкою за сукупністю приватних показників якості (**ППЯ**) x_i захватів швейних маніпуляторів, що мають кількісну та/або якісну оцінку та задовольняє наступним вимогам

- вимірюваності та однозначному кількісному (числовому) опису параметрів **ППЯ** x_i ;
- повноті обліку технічних, функціональних, технологічних та економічних **ППЯ** x_i в доцільному безлічі можливих їх поєднань між собою та з **УПЯ** K_j .

При кількісному характері **ППЯ** x_i оцінка значень **УПЯ** K_j може виконуватися на основі формалізованої аналітичної або імітаційної (аналогової або цифрової) моделей **УПЯ** K_j , що зв'язують структурні, кінематичні, динамічні, енергетичні або статистичні параметри конкретних захватів. Однак, оцінка значень K_j тільки по одному або двом **ППЯ** x_i або їх відношенню, навіть з використанням аналітичних моделей та їх вирішення, слід розглядати, як один з окремих випадків, пов'язаний з модернізацією існуючого технологічного обладнання та спрямованих, наприклад, на використання більш досконалого робочого інструменту **ЗШМ**.

При якісному характері **ППЯ** x_i оцінка значень **УПЯ** K_j може здійснюватися в балах, коефіцієнтах або рангах, які, у свою чергу, можуть бути пов'язаними з функціональною залежністю з режимами обробки або іншими параметрами, регламентованими ДСТУ, ISO-стандартами. При цьому як аналітична залежність часто використовується функція Едвіна-Харінгтона. Якісна оцінка **ППЯ** x_i також може виконуватися експертними групами або значення **ППЯ** x_i можуть бути запозичені з аналізу прототипів або аналогів в опублікованих джерелах технічної, наукової або патентної літератури.

Алгоритм вирішення поставленого завдання, задовольняє більшості наведених вимог, виконується у наступні два етапи:

- виявлення суттєвих **ППЯ** x_i для порівняльного аналізу функціонально адекватних технічних об'єктів у вигляді **ЗШМ** (рис. 2), кінематичних схем механізмів (модулів) та різних способів реалізації робочих процесів у технологічних машинах;
- алгоритмізація і матричне представлення множини робочих інструментів модулів швейних маніпуляторів цільового призначення в просторі множини параметрів та виявлення сукупності раціональних **ППЯ** x_i , які за вимогами, що висуваються, краще інших.

Типи структур **ЗШМ** для функціонально-адекватного захоплення м'яких, плоских неметалевих, пористих текстильних деталей наведено на рис. 3.

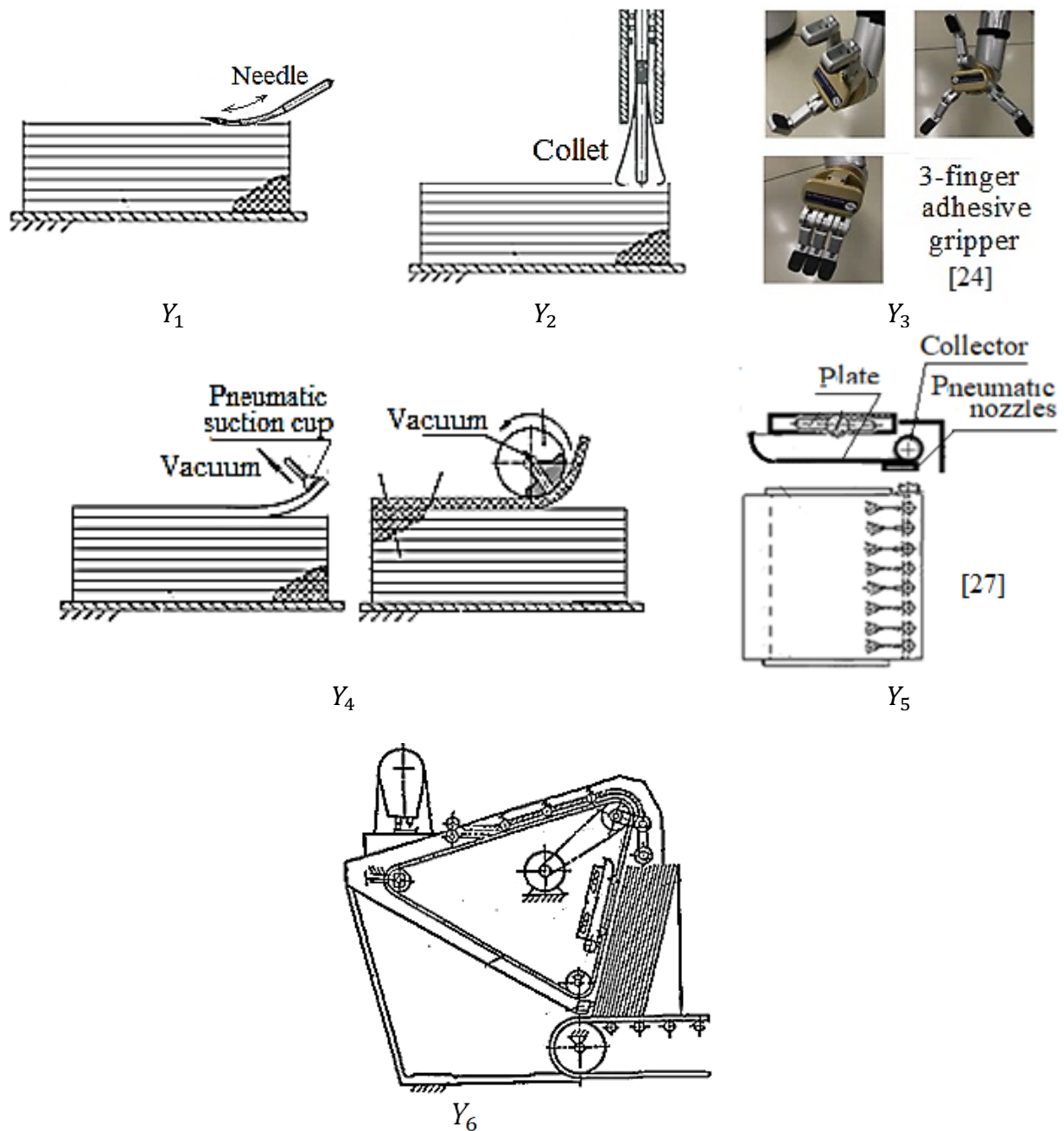


Рис. 3. Схеми функціонально-адекватних захватів швейних маніпуляторів деталей крою з текстилю

Для порівняльного аналізу ЗШМ (рис. 3) прийнято узагальнений показник якості $K_j \forall K, K(j), j = (1 \dots 6)$ процесу поштучного відділення від пачки текстильних деталей крою

На рис. 3 функціонально-адекватні ЗШМ позначені наступними ідентифікаторами Y_j :

- Y_1 – голчастий захват (механічне захоплення);
- Y_2 – цанговий захват (механічне захоплення);
- Y_3 – 3х пальцеве адгезивний захват (хіміко-механічне захоплення);
- Y_4 – захват з пневматичними присосками (пневматичний захват);
- Y_5 – пластина аеродинамічна (аеродинамічний захват);

Y_6 – комбінований 2х-3х інструментальний захват.

Для побудови математичних моделей УПЯ K_j вхідними параметрами (змінними) функціонально-адекватних ЗШМ прийнято наступні параметри ППЯ $x_i \forall x, x(i), i = (\overline{1 \dots 8})$ для поштучного відділення текстильних деталей крою з пачки :

$x_1 := 0.075 \dots 1.0$ – кількісний показник оцінки відношення площі перекриття робочим інструментом або робочим середовищем до площі поверхні деталі з текстилю, що відокремлюється з пачки;

$x_2 := 1.0 \dots 0, 0.5$ – якісний показник оцінки гарантованого відділення та утримання однієї деталі з текстилю з урахуванням сили інерції деталі під час її переміщення по осях OX та OZ ;

$x_3 := 1.0 \dots 0, 0.5$ – якісний показник оцінки типу траєкторії ЗШМ або характеру руху робочого середовища;

$x_4 := 0 \dots 1.5, 0.5$ – якісний показник оцінки способу взаємодії ЗШМ з деталлю крою з текстилю;

$x_5 := 1.0, 0$ – кількісний показник відношення коефіцієнта x_2 до продуктивності швейної машини $\left(\frac{x_2}{t_{шм}}\right)$;

$x_6 := 0 \dots 2.0, 1.0$ – кількісний показник продуктивності процесу поштучного відділення деталей при паралельному, послідовному та комбінованому способах контакту для пари «ЗШМ – деталь» (рис. 2);

$x_7 := 1.0, 0$ – кількісний показник наявності додаткових технічних засобів підвищення надійності поштучного відділення деталі з пачки;

$x_8 := 0, 3.0, 5.0$ – кількісний показник необхідності програмно керованих модулів переміщення деталей крою з текстилю в робочій зоні голкової пластини та притискної лапки швейної машини.

Для кількісного обґрунтування раціональних рішень на основі кореляційно-регресійного аналізу деякої сукупності можливих захватів швейних маніпуляторів і способів поштучного відділення з пачки деталей крою з текстилю побудовані локально-інтегральні моделі у вигляді рівняння лінійної (1) регресії:

$$K = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i. \quad (1)$$

Аналіз кореляційних зв'язків між обраними параметрами x_i виконаний на основі побудови квадратної симетричної кореляційної матриці $\|a_{ij}\|$, елементи якої $a_{ij} \neq 0$ для $i) j = j) i$ та $a_{ij} = 1$ для $i = j$ є коефіцієнтами r_{ij} парної кореляції (таблиця 1). Стовпець матричного рівняння складається з коефіцієнтів r_{ij} парної кореляції між i -м параметром x_i і загальним показником якості K_e , прийнятим за базовий параметр і наданим незалежними експертами. Ці коефіцієнти є мірою лінійної залежності між K_j обраної (з урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії) сукупністю всіх параметрів, які залишилися після відсівання незначущих параметрів x_i , тобто є параметрами R_k множинної кореляції і обчислюються за формулою [28]:

$$R_k = R_{1(2 \dots m)} = \sqrt{1 - \frac{|A|}{A_{II}}}, m = (1, M), \quad (2)$$

де $|A|$ – визначник кореляційної матриці $\|a_{ij}\|$;

A_{II} – алгебраїчне доповнення елементів a_{ij} .

Питанням відбору значущих для моделі входних ознак (в зарубіжній літературі така проблема відома, як featureselection) вирішується шляхом скорочення незначущих параметрів після аналізу моделі і нового перерахунку моделі. Скорочення числа незалежних змінних покликане зменшити розмірність моделі не тільки з тим, щоб видалити з неї всі незначущі ознаки, що не несуть в собі якоїсь корисної для аналізу інформації, і тим самим спростити модель, але і щоб усунути надлишкові ознаки. Тобто відбувається послідовна побудова моделі на всіх можливих комбінаціях наборів входних ознак з подальшим відбором того варіанту, який володів би найкращою описовою здатністю результуючого ознаки і при цьому містив би мінімум незалежних змінних.

Уточнення моделей і оцінка похибок виконано на основі аналізу кореляційних зв'язків і послідовного відсіву по мінімальній величині r_{ij} слабо корельовані з K_e параметрів x_i для Y_j захватів маніпуляторів поштучного відділення з пачки деталей крою з текстилю.

Таблиця 1

Матриця вихідних змінних та результати чисельних розрахунків К-моделей функціонально адекватних захватів маніпуляторів поштучного відокремлення з пачки деталей крою з текстилю

Захвати швейного маніпулятора	Приватні показники якості x_i								
	K_e	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
Y_1	1.0	0.15	1.0	0	0.5	1.0	0	1.0	0
Y_2	0.8	0.075	1.0	0	0	0	0	1.0	0
Y_3	0.9	0.2	0.5	0	0	0	0	0	0
Y_4	0.5	0.125	0	0	0.5	0	0.5	1.0	0
Y_5	1.0	0.70	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0
Y_6	1.1	1.0	1.0	0.5	1.5	1.0	2.0	1.0	3.0
Попарні коефіцієнти кореляції та елементи кореляційної матриці									
r_{ik1}	1.0	0.54	0.70	0.42	0.41	0.64	0.16	-0.03	0.44
a_{i1}	0.71	0.13	0.26	-0.02	0.04	0.13	-0.02	-0.07	-0.0009
r_{ik2}	1.0	0.54	0.70	0.42	0.41	0.64	0.16	-	0.44
a_{i2}	0.62	0.23	0.22	-0.03		0.11	-0.05	-	-0.001
r_{ik3}	1.0	0.54	0.70	0.42	0.41	0.64	-	-	0.44
a_{i3}	0.60	0.19	0.24	-0.03		0.12	-	-	-0.002
r_{ik4}	1.0	0.54	0.70	0.42	-	0.64	-	-	0.44
a_{i4}	0.60	0.15	0.25	-0.03	-	0.10	-	-	-0.004
r_{ik5}	1.0	0.54	0.70	-	-	0.64	-	-	0.44
a_{i5}	0.60	0.15	0.25	-	-	0.10	-	-	-0.008
r_{ik6}	1.0	0.54	0.70	-	-	0.64	-	-	-
a_{i6}	0.60	0.12	0.25	-	-	0.01	-	-	-

Так як значення коефіцієнтів множинної кореляції R_k знаходяться в діапазоні $0.8 \leq R_k \leq 0.9$, то можна стверджувати, що величина узагальненого показника якості K_j з використанням «К-моделей» розглянутої множини функціонально адекватних захватів швейних маніпуляторів, з ймовірністю близькою до «1» дорівнює лінійної комбінації параметрів x_i у відповідності з наступними отриманими моделями (3)–(8).

Таблиця 2

Коефіцієнти множинної кореляції R_k для моделей (3)–(8)

$R_1 = 0.8093$
$R_2 = 0.8195$
$R_3 = 0.8129$
$R_4 = 0.8333$
$R_5 = 0.8267$
$R_6 = 0.8682$

$$K1 = 0.7172 + 0.1281 x_1 + 0.2565 x_2 - 0.0239 x_3 + 0.0393 x_4 + 0.1336 x_5 - 0.0198 x_6 - 0.1736 x_7 - 0.009 x_8. \quad (3)$$

Після першого перерахунку для уточнення моделі $K1$ і відсіву слабо корельованого з моделлю $K1$ фактора x_7 отримана наступна розрахункова модель (4):

$$K2 = 0.6234 + 0.2298 x_1 + 0.2162 x_2 - 0.0335 x_3 - 0.0019 x_4 + 0.1112 x_5 - 0.0520 x_6 - 0.0013 x_8. \quad (4)$$

Після наступного перерахунку для уточнення моделі $K2$ і відсіву слабо корельованого з моделлю $K2$ фактора x_8 отримана наступна розрахункова модель (5):

$$K3 = 0.6077 + 0.1877 x_1 + 0.2565 x_2 - 0.0239 x_3 - 0.0393 x_4 + 0.1207 x_5 - 0.0024 x_8. \quad (5)$$

Після наступного перерахунку для уточнення моделі $K3$ і відсіву слабо корельованого з моделлю $K3$ фактора x_4 отримана наступна розрахункова модель (6):

$$K4 = 0.5978 + 0.1534 x_1 + 0.2508 x_2 - 0.0319 x_3 - 0.1022 x_5 - 0.0036 x_8. \quad (6)$$

Після наступного перерахунку для уточнення моделі $K4$ і відсіву слабо корельованого з моделлю $K4$ фактора x_3 отримана наступна розрахункова модель (7):

$$K5 = 0.5986 + 0.1382 x_1 + 0.2502 x_2 + 0.1013 x_5 - 0.0080 x_8. \quad (7)$$

Після наступного перерахунку для уточнення моделі $K5$ і відсіву слабо корельованого з моделлю $K5$ фактора x_8 отримана наступна розрахункова модель (8):

$$K6 = 0.6026 + 0.1224 x_1 + 0.2480 x_2 + 0.0957 x_5. \quad (8)$$

Розраховані значення узагальненого показника якості K_j , для шості функціонально адекватних захватів маніпуляторів поштучного відокремлення з пачки деталей крою з текстилю наведені в таблиці 2

Таблиця 3

Результати чисельних розрахунків значення K_j по моделям (3)–(8)

K_j для захватів $Y_1 \dots Y_6$	K_e	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Y1	1.0	0.9725	0.9842	0.9746	0.9745	0.9724	0.9646
Y2	0.8	0.8097	0.8568	0.8616	0.8601	0.8599	0.8598
Y3	0.9	0.8711	0.7774	0.7652	0.7539	0.7533	0.7511
Y4	0.5	0.5594	0.5991	0.6094	0.6170	0.6171	0.6179
Y5	1.0	1.0210	1.0290	1.0220	1.0170	1.0210	1.0210
Y6	1.1	1.0660	1.0530	1.0670	1.0780	1.0750	1.0690

Обираємо отриману К-модель (8), у якій залишилося наступні два кількісних і один якісний приватні показники якості поштучного відокремлення деталей крою з текстилю: x_1 – кількісний показник відношення площі перекриття робочим інструментом або робочим середовищем площі поверхні деталі з текстилю, що відокремлюється з пачки; x_2 – якісний показник гарантованого відділення та утримання однієї деталі з текстилю з урахуванням сили інерції деталі під час її переміщення по осях OX та OZ ; x_5 – кількісний показник відношення коефіцієнта x_2 до продуктивності швейної машини $\left(\frac{x_2}{t_{\text{шм}}}\right)$. Цім вимогам відповідає безконтактний аеродинамічний захват Y_5 .

Продуктивність маніпулятора з обраним захватом – аеродинамічною пластиною на етапі завантаження деталей крою повинна бути програмно узгоджена з часом робочого циклу технологічної машини згідно з наступною умовою:

$$t_3(t_{\text{пв}}, t_{\text{ор}}, t_{\text{п}})t_{\text{шм}}(n, T, t_{\text{д}}), \quad (9)$$

де t_3 – час завантаження ШМ;

$t_{\text{пв}}$ – час поштучного відокремлення, який складається з часу фази роз'єднання ворсу зчеплених волокон i -ої та $i-1$ поверхень деталей в стосі, з часу фази польоту та левітації у «м'якому вакуумі» та часу фази прилипання текстильної деталі до захвату маніпулятора;

$t_{\text{ор}}$ – час на орієнтацію деталі на захваті маніпулятора;

$t_{\text{п}}$ – час на подачу деталі в робочу зону голкової пластини ШМ;

$t_{\text{шм}}$ – основний час утворювання j -ого числа стібків на ділянках ниткового шва на ШМ;

n – частота обертання головного валу ШМ;

T – тип технологічної операції, яка виконується на ШМ;

$t_{\text{д}} = \sum_{k=1}^5 t_k$ – допоміжний час циклу роботи ШМ, де t_1 – час на зупинення головного валу з голкою у крайньому верхньому положенні; t_2 – час роботи механізму обрізки ниток; t_3 – час на переміщення притискної лапки вгору; t_4 – час на відключення регулятора натягу голкової нитки; t_5 – час на звільнення робочої зони голкової пластини для початку наступного циклу шиття.

Висновки:

1. Підкреслено, що пачка деталей крою з текстилю попередньо вже утворена з допомогою настільного і розкрійного технологічного устаткування і тому деталі у пачці перебувають у орієнтованому положенні в МЗП. Захвати маніпуляторів поштучного відділення з пачки деталей крою з текстилю є обов'язковою складовою роботою технологічних швейних комплексів.

2. Виконано обґрунтований та раціональний вибір з безлічі відомих та потенційно можливих захватів швейних маніпуляторів для поштучного відділення з пачки текстильних деталей крою при автоматизованому завантаженні швейних машин без використання промислових роботів загального призначення. Робота присвячена основній проблемі автоматизації завантаження швейних машин деталями крою з текстилю.

3. Побудовано математичні моделі (3–8) для запропонованого узагальненого показника якості K_j .

4. Виявлені закономірності кількісних та якісних залежностей K_j від приватних показників-параметрів для обґрунтованого вибору модуля захоплення з аеродинамічною пластиною модуля швейного маніпулятора для роботизації процесу шиття на швейних машинах при масовому виготовленні одягу, взуття та інших виробів із текстилю.

References

1. Piskorskii, G. A. (1971). Issledovanie protsessov avtomaticheskogo skachivaniia obuvnykh mashin: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.02.13 [Research on the processes of automatic downloading of shoe machines: thesis of a doctor of technical sciences: a specialty 05.02.13]. Moscow. 296 p. [in Russian].
2. Orlovskiy, B. V., Popovychenko, C. A. (2013). Obiektno-orientovanyi analiz i sintez tsyklovoho prohrannoho keruvannya avtomatyzovanyim zavantazhuvalnym prystroiem vzuttyevykh mashyn [Object-oriented analysis and synthesis of cyclic software control of an automated boot device of shoe machines]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of Khmelnytsky National University*, № 3, P. 182–189 [in Ukrainian].
3. Vakhnovskiy, S. S. (1966). Doslidzhennia hravitatsiinykh zhyvlynykiv mahazynnykh zavantazhuvalnykh prystroiv vzuttyevykh mashyn: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of gravitational feeders of shop loading devices of shoe machines: the abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].
4. Tonkovid L. A. Doslidzhennia protsesu avtomatychnoho oriyentuvannya ploskykh detalei vzuttia pry yikh zavantazhenni v tekhnolohichni mashyny: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam). Kyiv, 1967. 21 s. [in Ukrainian].
5. Seminikhyna, L. F. (1967). Vyznachennia optychnykh parametriv dlia kontroliu polozhennia vzuttyevykh detalei za vlastyivostiamy poverkhni: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Determination of optical parameters for control of position of footwear details on surface properties: the abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].
6. Emets, P. M. (1969). Doslidzhennia deiakykh faktoriv, shcho vplyvaiut na protses avtomatychnoho podavannia vzuttyevykh detalei: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of some factors influencing process of automatic giving of footwear details: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].
7. Polishchuk, V. M. (1971). Doslidzhennia protsesu poshtuchoho viddilennia ploskykh detalei vzuttia u vibratsiinykh mahazynnykh zavantazhuvalnykh prystroiakh: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam)

Література

1. Пискорский Г. А. Исследование процессов автоматического скачивания обувных машин: дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.02.13. МТИЛП. М., 1971. 296 с.
2. Орловський Б. В., Поповиченко С. А. Об'єктно-орієнтований аналіз і синтез циклового програмного керування автоматизованим завантажувальним пристроєм взуттєвих машин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. № 3. С. 182–189.
3. Вахновський С. С. Дослідження гравітаційних живильників магазинних завантажувальних пристроїв взуттєвих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты і процеси (по галузям). Київ, 1966. 20 с.
4. Тонковід Л. А. Дослідження процесу автоматичного орієнтування плоских деталей взуття при їх завантаженні в технологічні машини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты і процеси (по галузям). Київ, 1967. 21 с.
5. Семініхіна Л. Ф. Визначення оптичних параметрів для контролю положення взуттєвих деталей за властивостями поверхні: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты і процеси (по галузям). Київ, 1967. 20 с.
6. Емец П. М. Дослідження деяких факторів, що впливають на процес автоматичного подавання взуттєвих деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты і процеси (по галузям). Київ, 1969. 20 с.
7. Поліщук В. М. Дослідження процесу поштучного відділення плоских деталей взуття у вібраційних магазинних завантажувальних пристроях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 –

[Research of process of piece separation of flat details of footwear in vibrating shop loading devices: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 21 p. [in Ukrainian].

8. Petrosiuk, M. I. (1972). Doslidzhennia pnevmoiimpul'snykh lotkiv dlia lehkoï promyslovosti: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of pneumopulse trays for light industry: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

9. Kim, V. B. (1973). Doslidzhennia bunkernoho zavantazhuval'nogo prystroiu dlia peredachi vzut'tievoï furnitury na pozytsiiu skladannia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of the bunker loading device for transfer of footwear accessories to the assembly position: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

10. Shershnev, V. M. (1974). Doslidzhennia protsesu vibrotransportuvannia v rezhymakh z vidryvom ploskykh detalei vyrobiv lehkoï promyslovosti: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of the process of vibrotransportation in modes with separation of flat parts of light industry products: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

11. Yasko, M. I. (1975). Doslidzhennia hravitatsiinoho stapeliuvannia ploskykh detalei nyzu vzut'tia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Investigation of gravity stacking of flat parts of shoe bottoms: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

12. Lukanina, T. H. (1975). Doslidzhennia protsesu pnevmotransportuvannia ploskykh detalei v lehkoï promyslovosti: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of the process of pneumatic transportation of flat parts in light industry: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

13. Kulbasov, H. Zh. (1975). Doslidzhennia protsesu peremishchennia ploskykh detalei vzut'tia pry zavantazhenni yikh na skladalnu pozytsiiu: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po

Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1971. 21 с.

8. Петросюк М. І. Дослідження пневмоімпульсних лотків для легкої промисловості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1972. 20 с.

9. Кім В. Б. Дослідження бункерного завантажувального пристрою для передачі взуттєвої фурнітури на позицію складання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1973. 20 с.

10. Шершнеv В. М. Дослідження процесу вібротранспортування в режимах з відривом плоских деталей виробів легкої промисловості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1974. 20 с.

11. Ясько М. І. Дослідження гравітаційного стапелювання плоских деталей низу взуття: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1975. 20 с.

12. Луканіна Т. Г. Дослідження процесу пневмотранспортування плоских деталей в легкої промисловості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1975. 20 с.

13. Кулбасов Г. Ж. Дослідження процесу переміщення плоских деталей взуття при завантаженні їх на складальну позицію: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.

haluziam) [Research of process of movement of flat details of footwear at their loading on assembly position: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

14. Kritisberh, Ye. L. (1976). Doslidzhennia protsesu hravitatsiinoho orientuvannia ploskykh detalei nyzu vzuttia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of process of gravitational orientation of flat details of a bottom of footwear: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 21 p. [in Ukrainian].

15. Yankin, L. M. (1977). Doslidzhennia zavantazhuvannia prystroiu z rotornym shyberom ploskykh detalei nyzu vzuttia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Research of the loading device with a rotary gate of flat details of a footwear bottom: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

16. Polomoshnykh, S. A. (1978). Yssledovanye poshtuchnoho otdeleniyaznakopyteliamyahkykh ploskykh detalei verkha obuvy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Study of the piece compartment of the storage of soft flat parts of the shoe upper: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

17. Buiantuev, A. B. (1984). Rozrobka prystroiv poshtuchnoho vidokremлення ploskykh detalei vzuttia v roboto tekhnichnykh kompleksakh: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Development of devices of piece separation of flat details of footwear in robot technical complexes: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

18. Karmalita, A. K. (1985). Stvorennia prystroiv dlia kontroliu polozhennia ploskykh detalei vzuttia za vlastyviostiamy poverkhon: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Creation of devices for control of position of flat details of footwear on properties of surfaces: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

19. Busuiok, I. P. (1987). Universalnyi prystrii potokovoho avtomatychnoho orientuvannia ploskykh detalei vyrobiv lehkoï promyslovosti: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Universal device for streaming automatic orientation of

05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1975. 20 с.

14. Крицберг Е. Л. Дослідження процесу гравітаційного орієнтування плоских деталей низу взуття: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1976. 21 с.

15. Янкін Л. М. Дослідження завантажувального пристрою з роторним шибером плоских деталей низу взуття: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1977. 20 с.

16. Поломошних С. А. Исследование поштучного отделениязнакопителеймягких плоских деталей верха обуви: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1978. 20 с.

17. Буянтуев А. Б. Розробка пристроїв поштучного відокремлення плоских деталей взуття в роботу технічних комплексів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1984. 20 с.

18. Кармаліта А. К. Створення пристроїв для контролю положення плоских деталей взуття за властивостями поверхонь: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1985. 20 с.

19. Бусуйок І. П. Універсальний пристрій потокового автоматичного орієнтування плоских деталей виробів легкої промисловості: автореф. дис. ... канд. техн.

flat parts of light industry products: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 20 p. [in Ukrainian].

20. Vyhurskyi, L. (1988). Rozrobka zakhvativ dlia m'iahkykh shkir: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Development of soft skin grips: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 21 p. [in Ukrainian].

21. Realison, H. L. (1989). Doslidzhennia protsesu viddilennia lehkykh detalei zahotivok verkhу vzuttia iz stopy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Study of the process of separation of light parts of the workpieces of the upper of the shoe from the foot: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv. 21 s. [in Ukrainian].

22. Drapak, H. M. (1990). Avtomatyzatsiia potokovoi zbirkі ploskykh zahotivok verkhу vzuttia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.13 – Mashyny, aparaty i protsesy (po haluziam) [Automation of flow assembly of flat blanks of shoe uppers: the author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: a specialty 05.02.13 – Machines, devices and processes (on branches)]. Kyiv, 1990. 20 s. [in Ukrainian].

23. Alenyà, G., Ramisa, A., Moreno-Noguer, F., Torras, C. (2022). Characterization of Textile Grasping Experiments. URL: https://www.researchgate.net/publication/265151976_Characterization_of_Textile_Grasping_Experiment.

24. Türkmen, D., Koc, I., Sümer, B. (2015). Adhesive Pillar Based Air Levitation System for Contactless Manipulation of Fine Objects. *Procedia Engineering*. 120. 1124–1127. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.810. URL: https://www.researchgate.net/publication/283003285_Adhesive_Pillar_Based_Air_Levitation_System_for_Contactless_Manipulation_of_Fine_Objects.

25. Foresti, D., Klingauf, M., Ferrari, A., Poulikakos, D. (2013). Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 110. DOI: 10.1073/pnas.1301860110. URL: https://www.researchgate.net/publication/249649183_Acoustophoretic_contactless_transport_and_handling_of_matter_in_air.

26. Author's certificate № 776 975 (SU) Prystroi dlia podachi lystovoho materialu z pachky [Device for feeding

наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1987. 20 с.

20. Вигурський Л. Розробка захватів для м'яких шкір: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1988. 21 с.

21. Реалісон Г. Л. Дослідження процесу відділення легких деталей заготовок верху взуття із стопи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1989. 21 с.

22. Драпак Г. М. Автоматизація потокової збірки плоских заготовок верху взуття: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – Машины, аппараты и процессы (по галузям). Київ, 1990. 20 с.

23. Alenyà, G., Ramisa, A., Moreno-Noguer, F., Torras, C. Characterization of Textile Grasping Experiments. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/265151976_Characterization_of_Textile_Grasping_Experiment.

24. Türkmen, D., Koc, I., Sümer, B. Adhesive Pillar Based Air Levitation System for Contactless Manipulation of Fine Objects. *Procedia Engineering*. 2015. No. 120. P. 1124–1127. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.810. URL: https://www.researchgate.net/publication/283003285_Adhesive_Pillar_Based_Air_Levitation_System_for_Contactless_Manipulation_of_Fine_Objects.

25. Foresti, D., Klingauf, M., Ferrari, A., Poulikakos, D. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. No. 110. DOI: 10.1073/pnas.1301860110. URL: https://www.researchgate.net/publication/249649183_Acoustophoretic_contactless_transport_and_handling_of_matter_in_air.

26. Авторське свідоцтво № 776 975 (SU) Пристрій для подачі листового матеріалу з

sheet material from the pack], М. кл. В65Н 3/08. Б. В. Орловський, Н. А. Клочков. Published on November 7, 1980. Bulletin № 41 [in Ukrainian].
27. Orlovskiy, B. V. (2018). Mekhatronika v haluzevomu mashynobuduvanni [Mechatronics in the field of mechanical engineering]. Kyiv: KNUTD. 416 p. [in Ukrainian].
28. Ohirko, O. I., Halaiko, N. V. (2017). Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka: navchalnyi posibnyk [Probability theory and mathematical statistics: a textbook.]. Lviv: LvDUVS. 292 p. [in Ukrainian].

пачки, М. кл. В65Н 3/08. Б. В. Орловський, Н. А. Клочков. Опубл. 07.11.1980. Бюл. № 41.
27. Орловський Б. В. Мехатроніка в галузевому машинобудуванні. К.: КНУТД, 2018. 416 с.
28. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.

ORLOVSKY BRONISLAV

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the
Department of Applied Mechanics and Machines, Kyiv
National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7422-6000>
E-mail: mlp-knutd@ukr.net

MESYATS MICHAEL

Postgraduate student of the Department
of Applied Mechanics and Machines, Kyiv National
University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: mischalke@i.ua

ОРЛОВСКИЙ Б. В., МЕСЯЦ М. В.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-АДЕКВАТНЫХ ЗАХВАТОВ
МАНИПУЛЯТОРОВ ЗАГРУЗКИ ШВЕЙНЫХ МАШИН ДЕТАЛЯМИ КРОЯ
С ТЕКСТИЛЯ**

Цель. Разработка метода параметрического сравнительного анализа функционально адекватных захватов манипуляторов для загрузки швейных машин деталями кроя из текстиля.

Методика. Применена методика корреляционно-регрессионного анализа и экспертные оценки, позволяющие количественно обосновать принятие рациональных решений на стадии проектирования при разработке технического предложения. Статистический анализ позволяет избежать жестких требований, предъявляемых к системе преимуществ экспертов в методе направленного вектора, что является аналогом статистической модели и имеет ряд преимуществ по сравнению с широко известным методом априорного ранжирования факторов.

Результаты. Для сравнительного анализа функционально адекватных захватов текстильных деталей кроя модулей швейных манипуляторов предложен обобщенный показатель качества процесса поштучного отделения частей деталей от пачки в зависимости от нескольких параметров. Последовательное исключение несущественных параметров и реструктуризация математических моделей упростили модели, в которых важнейшие параметры оставлены для разработки модулей захвата манипуляторов для роботизированного шитья и автоматизации швейных машин.

Научная новизна. Выявлены основные закономерности и построены математические модели для предложенного обобщенного показателя качества п

роцесса поштучного отделения деталей кроя из текстиля от пачки в зависимости от нескольких параметров.

Практическая значимость. Разработан метод параметрического сравнительного анализа функционально адекватных захватов манипуляторов для автоматической загрузки швейных машин общего назначения деталями кроя из текстиля.

Ключевые слова: захваты; модули; швейный манипулятор; К-модели; детали кроя из текстиля.

ORLOVSKY B. V., MISIATS M. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF FUNCTIONALLY-ADEQUATE CAPTURES OF MANIPULATORS OF LOADING OF SEWING MACHINES BY TEXTILE CUTTING DETAILS

Purpose. Development of a method for parametric comparative analysis of functionally adequate grips of manipulators for loading sewing machines with textile cut details.

Methodology. The method of correlation-regression analysis and expert assessments are applied, which allow to quantitatively substantiate the adoption of rational decisions at the design stage when developing a technical proposal. Statistical analysis avoids the strict requirements imposed on the system of experts' advantages in the directed vector method, which is analogous to the statistical model and has a number of advantages over the well-known method of a priori ranking of factors.

Findings. For a comparative analysis of functionally adequate grips of textile parts cut modules of sewing manipulators, a generalized indicator of the quality of the process of piece-by-piece separation of parts from a pack is proposed, depending on several parameters. The successive elimination of non-essential parameters and the restructuring of mathematical models have simplified the models, in which the most important parameters are left for the development of manipulator grip modules for robotic sewing and sewing machine automation.

Originality. The main regularities are revealed and mathematical models are constructed for the proposed generalized indicator of the quality of the process of piece-by-piece separation of cut parts from textiles from a pack, depending on several parameters.

Practical value. A method has been developed for a parametric comparative analysis of functionally adequate manipulator grips for automatic loading of general-purpose sewing machines with textile cut parts.

Keywords: grippers; modules; sewing manipulator; K-models; textile cutting details.

УДК 677.017

КИЗИМЧУК О. П., МЕЛЬНИК Л. М.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНОГО ТИСКУ КОМПРЕСІЙНОГО ТРИКОТАЖУ

Анотація. Компресійна терапія є засобом лікування венозних виразок гомілки, венозної гіпертензії, венозного набряку, венозного застою та інших хронічних венозних захворювань. Основним принципом цього лікування є застосування певного тиску на тканини, що оточують уражену ділянку. Залежно від величини прикладеного тиску компресійний одяг може впливати на внутрішній об'єм вен, артерій та лімфатичних судин. Таким чином, важливим завданням є визначення тиску, який створює компресійний одяг на тіло.

Мета дослідження полягає в аналізі існуючих методів визначення контактного тиску компресійного одягу та обґрунтованому виборі методу для використання при розробці нових еластичних матеріалів.

Методика. В роботі використано класичний метод аналізу наукової літератури з наряду дослідження, а також два методи визначення контактного тиску компресійного трикотажу: прямий на апараті вимірювання тиску MST та непрямий з застосуванням закону Лапласа.

Результати. Існує багато інструментів і методів, які можна використовувати для вимірювання контактного тиску медичного компресійного одягу. Оскільки кожен з них відрізняється за протоколом та апаратурою існують відмінності у отриманих значеннях тиску. Прямі методи у порівнянні з непрямыми надають найбільш достовірні результати, адже дають змогу вимірювати тиск як статичний, так і динамічний не тільки на манекені (*in vitro*) але й безпосередньо на людині (*in vivo*). Однак дані методи потребують наявності спеціального обладнання. Проведені дослідження показали, що непрямий метод визначення контактного тиску, який використано в роботі, не рекомендується до використання при оцінці готових виробів для терапевтичного лікування, однак може бути застосований при проведенні досліджень з розробки нових компресійних матеріалів та виробів з метою порівняння та вибору найбільш ефективних варіантів.

Новизна роботи полягає у детальному аналізі існуючих методів визначення контактного тиску компресійного одягу, їх класифікації та оцінці ефективності застосування як з точки зору терапевтичних послуг, так з точки зору розробки нових компресійних матеріалів та виробів.

Практична значимість. За результатами проведеного аналізу надані рекомендації щодо застосування непрямого методу визначення контактного тиску при розробці та дослідженні матеріалів для компресійних виробів

Ключові слова: компресійний трикотаж; контактний тиск; закон Лапласа; методи визначення тиску; навантаження; видовження.

Вступ. Компресійна терапія є засобом лікування та профілактики багатьох захворювань (різні типи хронічних набряків, запобігання венозної тромбоемболії та венозної виразки, лікування опіків та переломів або інших ушкоджень м'яких тканин). Основним принципом цього лікування є застосування певного тиску на тканини, що оточують уражену ділянку. Венозний тиск у щиколотці в положенні сидячи або стоячи дорівнює гідростатичному тиску, що створюється висотою стовпа крові між правим передсердям і точкою вимірювання. Цей гідростатичний або венозний тиск коливається в межах від 6,7 до 13,3 кПа (1 мм рт.ст. = 0,133 Па), на що значною мірою впливає сила тяжіння, положення тіла та рух кінцівок. Високий тиск (~12 кПа) досягається в положенні стоячи, а в положенні лежачи ноги знаходяться на рівні серця, тому тиск низький, зазвичай коливається від 0 до 1,3 кПа. Сидячи, тиск підвищується приблизно до 5,3 кПа. У ногах найбільше навантаження, оскільки венозна система повинна рухати кров проти сили тяжіння в положенні стоячи [1].

Компресійна терапія передбачає застосування зовнішнього тиску на організм людини. Залежно від величини прикладеного тиску компресійна пов'язка може впливати на внутрішній об'єм вен, артерій та лімфатичних судин. Основним елементом компресійної терапії є пов'язки, бинти та саме компресійний одяг. Матеріали, що найчастіше використовують в компресійному одязі, містять еластомерні нитки (полімерні матеріали, що складаються не менш ніж на 85% із сегментованого поліуретану) через їх гумоподібну еластичність [2]. Виготовлення таких матеріалів здійснюють загальновідомими способами виробництва текстильних матеріалів: вязання кулірним [3] та основовязальним [4] способами, ткацтво. Компресійний одяг повинен мати здатність повторювати контури тіла (наприклад, панчохи); контрольовані гнучкість (пружність) та розтяжність; виготовлятися різних форм та розмірів, щоб відповідати різним статурам. У разі застосування пов'язок та бинтів потрібне суворе дотримання умов взаємодії між текстилем і тілом, адже відмінності в розмірах та об'ємах мають вирішальне значення для лікування кожного окремого пацієнта [5]. Окрім того, необхідна ретельна оцінка набряку та його тяжкості, даних про пацієнта та відповідного вибору типу компресійної терапії. Є кілька європейських національних стандартів для компресійного трикотажу, серед яких британський стандарт BS 6612:19857, французький стандарт ASQUAL8 і німецький стандарт RAL-GZ 387:2009. Стандарти описують методи, які використовуються для характеристики рівня стиснення гомілки за допомогою компресійного трикотажу, і зосереджуються на вимірюванні *in vitro* тиску, який буде застосовуватися в різних точках кінцівки. Компресію, вимірю на щиколотці, використовують для класифікації панчішно-шкарпеткових виробів на I–IV класи компресії. Однак діапазон тиску для кожного класу варіюється в різних стандартах і для вимірювання компресії використовують три різні методики.

Загалом існує два види тиску, які створюють компресійні пов'язки: статичний і динамічний (робочий) [6]. Статичний тиск – це постійний тиск, який компресійний матеріал чинить на тканини і судини, поки м'язи розслаблені. Його часто описують як прикладений тиск, він пов'язаний з можливістю накладення кількох шарів та ступенем розтягування компресійної пов'язки під час її накладання. Конкретне значення залежить від типу бинтів, попереднього розтягування під час накладення, міцності бинта або панчохи, а також стану бинта, наприклад його терміну застосування та кількості циклів носіння та прання. Динамічний тиск визначається як тиск, що діє під час деформації компресійного одягу у багатьох напрямках. Робочий тиск виникає, коли м'яз опирається стискаючому засобу, оскільки його об'єм збільшується і діє тимчасово [7]. При застосуванні пов'язок у пацієнтів повинна створюватися безперервна компресія в напрямку передбачуваного транспортування рідини, наприклад, від дистального до проксимального відділу ноги. Цей градієнт тиску досягається накладенням компресійної пов'язки з постійним подовженням від щиколотки до стегна.

Правильна адаптація компресійних засобів до індивідуальної геометрії тіла пацієнта є важливим аспектом компресійної терапії для досягнення бажаного терапевтичного успіху. Для реалізації необхідного тиску можна використовувати різні методи. На початку терапії вимірювальною стрічкою збирають відповідні обхвати та довжини (наприклад, для ноги), а потім обирають компресійний трикотаж відповідно до таблиці розмірів чинного стандарту. В той же час з розвитком програмованого в'язального обладнання компресійний виріб може бути виготовлений індивідуально в певних геометричних межах.

Постановка завдання. Науковцями світу був проведений значний обсяг роботи для поліпшення розуміння основних моментів проектування компресійного одягу. Одним з головних пріоритетів є створення можливості моделювати, прогнозувати та вимірювати тиск,

що фактично чиниться на передбачувану точку (точки) на тілі, з акцентом на його регулюванні для забезпечення бажаного тиску у потрібному місці.

Ефективність компресійного лікування, безсумнівно, залежить від тиску, що створюється на межі між пов'язкою (компресійним одягом) та шкірою. Цей тиск називають інтерфейсним тиском або контактним тиском. Зазвичай його виражають у мм рт.ст. (1 мм рт.ст. = 133,3 Па). Контактний тиск має бути досить точним і не повинен бути нижче або вище встановленого рівня, інакше це може призвести до певних ускладнень під час лікування. Інтерфейсний тиск, який чинить компресійна пов'язка, залежить від кількох факторів, таких як форма та розмір кінцівки, техніка накладення та вид пов'язки (бинт чи одяг), фізичні та структурні властивості текстильних матеріалів, фізичні навантаження пацієнта тощо.

Дослідження та кількісна оцінка тиску, створюваного компресійним одягом, були розпочаті в другій половині двадцятого століття Ван дер Моленом [8], який заклав основу дослідженнями в 1955 році. До цього часу отримані значення тиску базувалися на оцінках досягнутого ефекту лікування набряків. З одного боку, лікуючому терапевту потрібні знання про результуючий тиск, який може досягнути відповідним засобом. А прилади для вимірювання тиску необхідні для контролю якості існуючих компресійних виробів. Наприклад, впровадження чотирьох категорій компресії вимагало визначення значень стиснення і, таким чином, розробки відповідних процедур тестування, включаючи доказ їх практичності та відтворюваності. Визначення тиску стиснення на основі залежності сила-подовження використовуваних матеріалів і адаптації цих даних до розміру ноги пацієнта складає основу так званих непрямих методів вимірювання, які адаптовані здебільшого до компресійних бинтів. В той же час, запис значень компресії безпосередньо між бинтом і шкірою, що є особливістю прямих методів, визнано найкращим методом для вирішення багатьох медичних чи текстильно-технічних проблем [9].

Отже **метою даної роботи** є аналіз існуючих методів визначення тиску компресійного одягу, який він чинить на тіло людини при його використанні, та порівняння результатів дослідження контактного тиску, який створює еластичний основопов'язаний трикотаж на тіло людини, отриманих двома різними методами.

Методи визначення тиску одягу на тіло. Отже існуючі методи визначення тиску, який створює компресійний виріб на тіло людини, можна розділити на три групи [7]: прямий метод; непрямий метод; контроль успішності терапії. Окрім того, прямі методи та відповідні їм пристрої можна охарактеризувати відповідно до того, чи вони вимірюють тиск за допомогою випробувального манекену (in vitro) чи безпосередньо на тілі людини (in vivo) [10].

Прямі методи. Метою прямих методів є вимірювання компресійного тиску безпосередньо на тілі людини. Підхід до прямого тестування означає, що контактний тиск вимірюють під час нанесення матеріалу на поверхню, тому між поверхнею та компресійним матеріалом потрібно розмістити датчик. Тиск можна виміряти безпосередньо на нозі або манекені, помістивши датчики тиску між бинтом і шкірою (манекеном). Однак залишається предметом суперечок питання як знайти точне місце на нозі для розміщення датчика тиску. Проблема в тому, що кінцівки людини не мають ідеальної циліндричної форми, а тиск обернено пропорційний радіусу кінцівки. Таким чином, контактний тиск можна визначити лише на обмеженій і невеликій площі з постійним розміром [7]. Це означає, що розмір датчика також суттєво впливає на вимірювальні значення. Тому результати цих методів є лише наближеними значеннями для визначених ділянок ноги. Рекомендовано також не робити вимірювань над кістковими виступами або сухожиллями гомілки, оскільки твердість поверхні суттєво вплине на отримане значення тиску [11].

На сьогодні відомо багато різновидів датчиків, деякі з яких можна використовувати для вимірювання як динамічного, так і статичного тиску на тіло. Спочатку це були прості

манометри. Пізніше з'явилися кілька електропневматичних систем, які дозволили проводити динамічні вимірювання на пацієнтах в русі. З 1965 року частіше почали використовувати п'єзорезистивні датчики. Вимоги до датчиків актуальні і сьогодні: незначний об'єм датчика; легкість застосування; можливість одночасного вимірювання в різних точках [7]. Останнє десятиліття охарактеризовано значним розвитком смарт-технологій та розробкою гнучких невеликих датчиків на текстильній основі, зокрема і датчиків тиску, які безпосередньо інтегровані у одяг [12] та дають можливість прямого вимірювання контактного тиску.

Партіш та ін. [9] класифікували різні системи вимірювання тиску за типами датчиків тиску та запропонували кілька рекомендацій щодо використання відповідного методу прямого (in vivo) вимірювання контактного тиску на нозі. Усі датчики мають певні переваги та недоліки для задоволення конкретних потреб вимірювання тиску. На підставі проведеного аналізу було запропоновано головні характеристики «ідеального» датчику тиску [9]: нечутливий до концентрації сили будь якої величини; гнучкий – нечутливий до згинання, але не розтягується; довговічний та надійний; стійкий до перевантажень; електронно простий; низько вартісний; має низький гістерезис та низьку повзучість; нечутливий до перепадів температури і вологості; забезпечує безперервний вихід даних; має лінійну реакцію на прикладений тиск; забезпечує дослідження у русі з високою частотою дискретизації; робочий діапазон відповідає біологічним параметрам; точний; має роздільну здатність (час 0,1 с, амплітуда 0,1 мм рт.ст.); тонкий; може випускатися у широкому спектрі розмірів.

Найбільш розповсюдженими вимірювальними системами для визначення контактного тиску, які широко представлені на ринку, є наступні.

Kikuhime® (TT Medi Trade, Данія) простий, надійний і економічний пристрій, що забезпечує точні та відтворювані дані (<https://ttmeditrade.dk/kikuhime/>). Використовуючи прокладку, яка надається для полегшення видалення датчика, можна розробити методи перевірки тиску, досягнутого під пов'язкою пацієнта, без подальшої необхідності знімати пов'язку. *Kikuhime* може працювати з кількома пневматичними датчиками, що дозволяють вимірювати тиск у різних точках під компресійною пов'язкою. Основним недоліком є те, що він не має зовнішнього підключення і не може використовуватися для динамічних випробувань. Крім того, його калібрування не дозволяє проводити серію послідовних вимірювань, оскільки пристрій не можна повторно відкалібрувати під пов'язкою.

PicoPress® (Microlab Elettronica Sas, Італія) – це пристрій для вимірювання контактного тиску компресійного одягу як у статичних, так і в динамічних умовах (<http://www.microlabitalia.it/index.php>). *PicoPress®* характеризується надзвичайною простотою використання і не потребує початкового калібрування. Це пневматична вимірювальна система, оснащена ультра пласким пневматичним зондом діаметром 5 см і поверхнею 19,62 см², в яку перед вимірюванням накачують 2 куб. см повітря за допомогою шприца з електронним керуванням, які інтегровані в систему. Дані можна зберігати в пам'яті пристрою. Систему можна підключити до комп'ютера через порт USB для безперервного вимірювання тиску під час динамічних випробувань.

Система вимірювання компресії *MST* (SWISSLASTIC AG, Швейцарія) є провідною і найбільш використовуваною системою для компресійних панчішних виробів (<https://www.swisslastic.ch/en/>). Результати вимірювань можна зчитувати безпосередньо з пристрою. Серія пристроїв для тестування медичних панчіх мають один недолік для випробувань в лабораторних умовах, а саме те, що для кожного розміру необхідно виготовляти окрему дерев'яну ніжку-манекен. Цей недолік усунений у *MST Professional*, який завдяки своїй змінній формі ноги може покривати 95% відомих розмірів, як для стандартних панчішних виробів, так і виготовлених на замовлення. Високо точна 3-D конструкція

виготовлена з алюмінію та легкого композитного матеріалу. Особливою перевагою є те, що вимірювання можуть бути повністю відтворені різними операторами.

Talley Digital Skin Evaluator SD500V (Talley Medical Group Ltd, Великобританія) – точний, простий у використанні, портативний вимірювач контактного тиску з цифровим зчитуванням. Особливістю пристрою є наявність двох пневматичних датчиків тиску, які різняться формою та розмірами (10 см і 2,8 см), що розширює можливості застосування пристрою на різних ділянках тіла. Ці датчики швидко підключаються через штекер і повітряний роз'єм. Компактна конструкція дозволяє за необхідності переносити його з місця на місце. Пристрій можна використовувати для зручного розташування пацієнта на інвалідному візку з подушкою для зняття тиску.

I-Scan™ (Tekscan Inc., США) – це потужний інструмент, який точно вимірює та аналізує тиск між двома поверхнями, використовуючи тонкий і гнучкий п'єзорезистивний датчик (<https://www.tekscan.com/>). Система, яка складається з датчиків і програмного забезпечення, одночасно вимірює силу і контактний тиск, а надзвичайно тонкий тактильний датчик забезпечує мінімальну відстань між вимірюваними поверхнями, що дозволяє зменшити похибку вимірювання контактного тиску. Датчики можуть мати різну форму та розміри.

Кокай з колегами [13] проаналізувала сімнадцять пристроїв для вимірювання тиску компресійного одягу, що використовують для лікування захворювань вен та набряків. Ці пристрої були розділені на п'ять груп датчиків, включаючи пневматичні, п'єзоелектричні, оптичні, п'єзорезистивні та ємнісні. В результаті досліджень встановлено, що жодна з категорій датчиків не має значних переваг над іншими, проте деякі окремі датчики показали вищу точність. Важливими факторами, які підвищили точність вимірювання, були процес калібрування та величина застосовуваного тиску.

Важливим напрямом дослідження є порівняння значень контактного тиску, які отримані методами *in vitro* та *in vivo*. Так Партіц з колегами у своєму дослідженні [14] за допомогою MST системи встановив, що профіль тиску, виміряний у чотирьох точках вздовж ноги, показав спадаючий градієнт на дерев'яній моделі, але не на людській нозі через особливості геометрії гомілковостопного суглоба. В той же час кореляція між вимірюваннями *in vivo* та *in vitro* була дуже значущою. Отже отримані результати підтверджують можливість використання методу *in vitro* для визначення контактного тиску, що значно спрощує процес проектування та оцінки властивостей компресійного одягу.

Непрямі методи. Основним принципом непрямих методів є визначення поведінки текстильного матеріалу у системі навантаження-подовження. Метод добре підходить для порівняння медичних компресійних виробів, їх якості та виробництва. Слід мати на увазі, що отримані значення тиску дійсні лише для ніг, які відповідають досліджуванним подовженням і стандартним розмірам. Окрім того, непрямі методи недостатньо підходять для багатошарових компресійних пов'язок: окрему пов'язку можна охарактеризувати за діаграмою навантаження-подовження, але оцінити тертя шарів між собою доволі важко.

В основу непрямих методів покладено Закон Лапласа, який використовують для прогнозування статичного контактного тиску, створюваного бинтом відразу після накладення. Він залежить від натягу матеріалу, кількості шарів, ширини бинта та окружності кінцівки. Виведення закону Лапласа можна легко описати за допомогою спрощених моделей сфери чи циліндри, які можуть бути моделями багатьох органів. У разі наповненого повітрям циліндра, видаленого з довгої труби, сили, що діють на стінку циліндра, повинні врівноважити зовнішнє напруження захопленого повітря. Механіка закону Лапласа (рис.1) може бути описана наступним виразом:

$$P = T/R, \quad (1)$$

де P – тиск, який створює матеріал циліндру, Па;
 T – натяг матеріалу, Н;
 R – радіус кривизни циліндру, м.

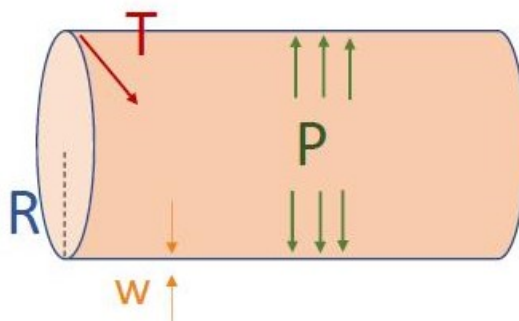


Рис. 1. Закон Лапласа для циліндру

З урахуванням можливості використання компресійного матеріалу певної (w) ширини (m) у декілька (n) шарів матеріалу формула (1) приймає вигляд:

$$P = \frac{T \cdot n}{R \cdot w}. \quad (2)$$

Це означає, що контактний тиск прямо пропорційний натягу бинта, але обернено пропорційний радіусу кривизни кінцівки, на яку його накладають. Одиниці вимірювання, які використовують в початковій формі рівняння, зазвичай не застосовують в медичній практиці. Крім того, визначення профілю кінцівки за її радіусом має незначну практичну цінність, оскільки цей параметр практично неможливо визначити в звичайних клінічних умовах. Тому формулу було модифіковано і вона набула вигляду:

$$P = \frac{T \cdot n \cdot 4620}{C \cdot W}, \quad (3)$$

де P – тиск у мм рт.ст.,
 T – натяг бинта в кгс;
 n – кількість нанесених шарів бинта;
 C – окружність кінцівки в см;
 W – ширина бинта в см;
4620 – константа, яку утворено перетворенням одиниць вимірювання.

Слід зазначити, що результати проведеного дослідження [15] продемонстрували, що тиск, створений під компресійною пов'язкою, накладеною на циліндр або формувач з круглим поперечним перерізом, можна точно передбачити за допомогою модифікованого рівняння Лапласа, за умови, що натяг пов'язки та окружність кінцівки точно відомі. Очевидно, оскільки кінцівки не мають круглого поперечного перерізу, розрахований тиск буде середнім тиском, який був би зафіксований, якби можна було виміряти нескінченну кількість точок по колу. Як наслідок, значення індивідуальних показань, знятих за допомогою комерційних приладів для вимірювання тиску, піддається серйозному сумніву, оскільки вони будуть повністю залежати від розташування датчика в будь-якій точці по колу ноги.

Найбільш відомими серед непрямих методів визначення тиску є наступні, які розроблені у 80-х роках минулого століття [7]: англійський пристрій НАТРА; німецький метод НОСУ (у Хоенштайні); пневматичні вимірювання, започатковані нідерландським вченим Р. Столком.

Оригінальний пристрій HATRA був розроблений для перевірки одягу відповідно до чинних британських стандартів компресійного трикотажу (BS 6612:1985) [10]. Він відомий як Mark II (Mk2) і є пристроєм, що містить два металевих бруска, якими можна маніпулювати, щоб імітувати спрощену форму ноги (рис. 2). Є сім правих і сім лівих попередньо визначених положень регулювання, які встановлюються за допомогою шарнірів. Верхня планка є рухомою, її можна піднімати та опускати за допомогою ручного важеля. Нижня планка фіксована і має дві вигнуті насадки, які можна використовувати для імітації ікри або стегна. Ці насадки можна встановлювати в різних положеннях, щоб пристосуватись до різної довжини (наприклад, коротка, середня, довга та дуже довга). Тримачі для панчіх також доступні в різних розмірах (тобто довга довжина для панчіх до стегон і коротка для панчіх до колін).

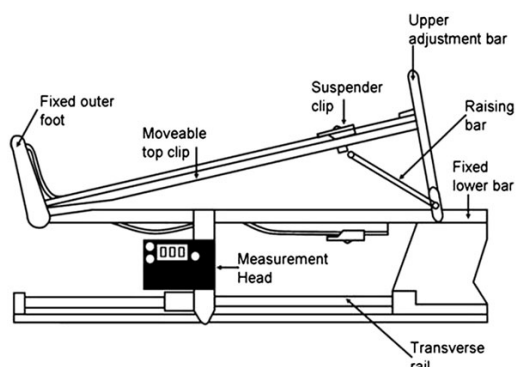
HOSY був розроблений для перевірки компресійного одягу відповідно до чинних німецьких стандартів (RAL GZ 387/1,2). Окрім контактного тиску за допомогою пристрою можна вимірювати подовження, силу розтягування та залишковий тиск. Пристрій складається з серії тензометрів і системи захоплення, яка кріпиться за допомогою спеціалізованих затискачів, а також програмного забезпечення HOSYcap для сканування та обробки результатів (рис. 3). Маркувальну дошку з регульованими затискачами використовують для утримання нижнього краю одягу. Лінійку використовують для розмітки одягу в місцях, зазначених виробником. У HOSY використовують 20 пар затискачів, кожен з яких має ширину 5 см. Це дозволяє випробовувати одяг будь-якої форми (розміром до 100 см) у різних місцях, не руйнуючи його. Випробування проводять шляхом фіксування одягу в затискачах на задану довжину, а потім розтягування його до заданої ширини, тобто є можливість одночасного розтягування у двох напрямках. Безпосередньо вимірюється сила, необхідна для розтягування одягу по окружності, яку використовують для визначення величини контактного тиску.

Непрямі методи є більш доступними для багатьох науковців, які працюють над розробкою текстильних матеріалів для компресійних виробів. Так науковці коледжу текстилю ім. Вільсона (Університет штату Північна Кароліна, США) для визначення контактного тиску компресійних матеріалів різних складу та структури [16] використовували універсальну випробувальну машину MTS Q-Test/5 з датчиком навантаження. Для адаптації обладнання були виготовлені спеціальні рукоятки довжиною 30,48 см для затискачів (рис. 4). На основі розробленого непрямого методу визначення тиску визначали значення жорсткості (EI), розраховували криві розтягування-подовження та дані тиск-подовження для компресійних бинтів та панчішно-шкарпеткових виробів.

Інший підхід використав Кумар Б. з колегами під час дослідження контактного тиску та аналіз факторів, які спричиняють його зміни, під час лікування компресійними пов'язками [17]. Контактний тиск вимірювали на експериментальній установці, яка оснащена онлайн системою, з використанням датчиків перепаду тиску. Робота установки заснована на пневматичному принципі, який враховує зміну тиску повітря всередині балона при застосуванні компресійного матеріалу. Основні етапи вимірювання: закріплення повітряного міхура на манекені у точці виміру; надування міхура за допомогою ручного насоса; вимірювання початкового тиску P_1 за допомогою датчиків; одягання на манекен з міхуром компресійної пов'язки; вимірювання створеного тиску P_T ; визначення контактного тиску за формулою $P = P_T - P_1$. Для дослідження використано два види манекенів ноги: для статичного (рис. 5.а) та динамічного (рис. 5.б) режимів. Динамічний сегмент ноги імітує динамічну поведінку людської кінцівки, тобто ходьбу, біг, біг підтюпцем тощо, для визначення їх впливу на характеристики компресійної пов'язки. В результаті проведених досліджень встановлено, що в динамічному режимі зниження контактного тиску відбувається швидше і на більшу величину, ніж у статичному режимі. Вивчення основних характеристик компресійного бинта при релаксації та втомі допомагає оцінити його поведінку під час лікування.



а – зовнішній вигляд



б – принципова схема

Рис. 2. Пристрій Mk2 від Natra

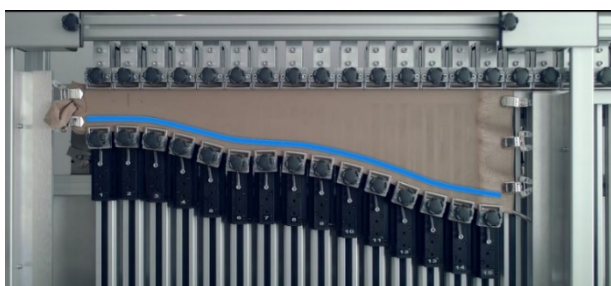


Рис. 3. HOSY пристрій

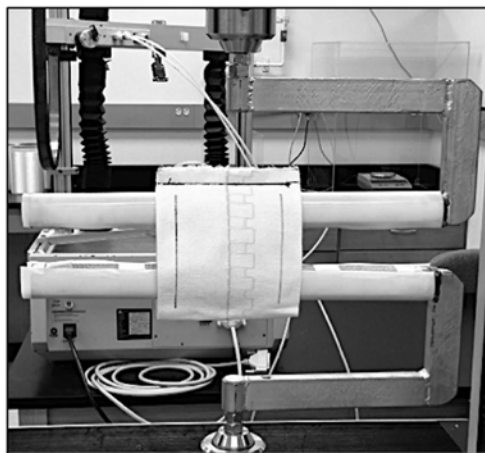
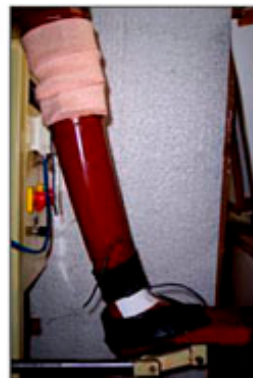


Рис. 4. Зразок компресійного бинта під час випробування [16]



а – статичного



б – динамічного

Рис. 5. Прототипи манекенів для визначення контактного тиску [17]

Контроль успішності терапії. Поширеною тенденцією у світовій медицині є так звана «доказова медицина». Вона служить для контролю якості терапії та надає звіти про ефективність, які вимагають постачальники послуг для оплати відповідних терапевтичних послуг. Ця тенденція є також типовою для компресійної терапії. «Компресійна терапія, заснована на доказах» є вимогою Міжнародного союзу флебологів (IUP), який провів оцінку рандомізованих моніторингових досліджень щодо терапії кількох захворювань вен та лімфи та внес пропозиції щодо методів підтвердження ефективності. Однак було встановлено, що важливим об'єктом дослідження є результуючий контактний тиск компресійного засобу та підведення відповідного терапевтичного процесу до тиску стиснення, а головним методом його визначення є пряме визначення тиску *in vivo* або хронологічний профіль тиску.

Отже існує багато інструментів і методів (непрямих та прямих, *in vivo* та *vitro*), які можна використовувати для вимірювання контактного тиску медичного компресійного одягу. Оскільки кожен з них відрізняється з точки зору протоколу оцінки компресії, існують відмінності у отриманих значеннях тиску. Це є проблемою з точки зору міжнародної стандартизації, а також визначення відповідного продукту для призначення пацієнту.

Порівняння результатів визначення контактного тиску прямим *in-vitro* та непрямим методами. *Методика.* Дослідження тиску виробу на тіло людини прямим методом проводили на апараті вимірювання тиску MST швейцарської фірми SWISSLASTIC AG відповідно RAL-GZ 387/1 [18]. Периметр дерев'яного манекену ноги (С), де відбувається вимірювання, обрано на 2 рівнях: 370 мм та 595 мм. Ступінь видовження зразка при одяганні на манекен обрано 20 % як найбільш уживаний рівень параметру. Ширина зразків становила 5 см. Для кожного варіанту полотна зроблено по 3 паралельних вимірювання показника, середні значення якого використано для аналізу.

Дослідження тиску виробу на тіло людини непрямим методом проводили у два етапи. На першому етапі на розривній машині РМ-30 проводили розтягування зразків при затискній довжині 100 мм і при видовженні 20 % фіксували значення навантаження, яке отримує зразок. Для кожного варіанту полотна зроблено по 5 паралельних вимірювань та визначено середнє значення навантаження. Після чого за формулою (3) визначали значення контактного тиску.

Об'єктом дослідження є еластичний основов'язаний трикотаж утокового переплетення, який використовують у виготовленні бандажних виробів. Поліефірні нитки є головною сировиною: нитку 16,7 текс застосовують як ґрунтову у переплетення ланцюжок, нитку 33,4 текс в декілька ($k = 2, 3$ або 4) кінців – як поперечний уток, які прокладають з обох боків на всю ширину полотна. Еластичність полотну забезпечує поліуретанова нитка діаметром 0,8 мм, яка прокладається з визначеним попереднім видовженням ($\epsilon = 210, 240$ та 270%) у вигляді повздовжнього утку в кожному петельному стовпчику. В результаті реалізації спланованого експерименту було вироблено 9 варіантів еластичного трикотажу на тамбурній машині 15 класу.

Результати дослідження контактного тиску, який створює еластичний матеріал на тіло людини при його розтягуванні на 20 %, зведено у табл. 1.

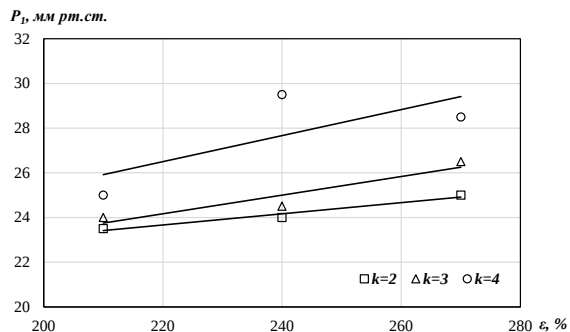
Очевидно, що результати вимірювання контактного тиску, отримані за двома методиками різняться між собою, при цьому більшу різницю в показниках отримано для більшого периметру манекену. Отже непрямий метод визначення контактного тиску, який використано в роботі, не рекомендується до використання при оцінці готових виробів для подальшої рекомендації пацієнтам.

З іншого погляду, результати вимірювання контактного тиску за різними методами показують подібність залежностей показника від вхідних параметрів експерименту (рис. 6).

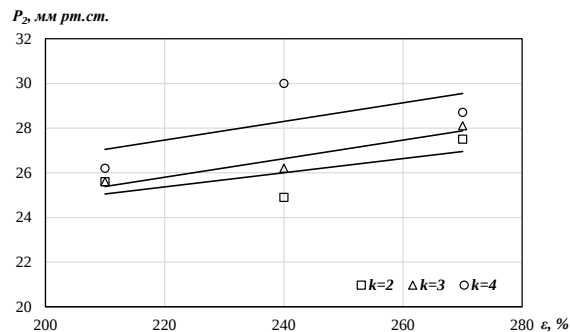
Таблиця 1

Тиск еластичного основов'язаного трикотажу

Варіант	Попереднє видовження еластомерної нитки, ε , %	Кількість ниток у поперечному утці, k	Навантаження при розтягуванні на 20 %, T , кГс	Периметр манекену 370 мм			Периметр манекену 595 мм		
				Значення тиску, прямий метод, P_1 мм рт.ст	Значення тиску, розраховане P_2 мм рт.ст	Відхилення, %	Значення тиску, прямий метод, P_1 мм рт.ст	Значення тиску, розраховане P_2 мм рт.ст	Відхилення, %
1	210	2	1,02	23,5	25,6	8,2	13,5	15,9	15,1
2	210	3	1,02	24,0	25,6	6,2	12,5	15,9	21,4
3	210	4	1,05	25,0	26,2	4,6	15,5	16,3	4,9
4	240	2	1,00	24,0	24,9	3,6	20,0	15,5	29,0
5	240	3	1,05	24,5	26,2	6,5	17,5	16,3	7,4
6	240	4	1,20	29,5	30,0	1,7	17,0	18,6	8,6
7	270	2	1,10	25,0	27,5	9,1	22,0	17,1	28,6
8	270	3	1,12	26,5	28,1	5,7	18,5	17,5	5,7
9	270	4	1,15	28,5	28,7	0,7	19,0	17,8	6,7



а – прямий метод вимірювання



б – непрямий метод вимірювання

Рис. 6. Залежність контактного тиску від попереднього видовження еластомеру (для периметру 370 мм)

Очевидно, що як попереднє видовження еластомерної нитки так і кількість ниток, які утворюють поперечний уток мають вплив на величину тиску еластичного трикотажу на тіло людини. Зростання вхідних показників призводить до збільшення тиску трикотажу на тіло людини, що може бути пов'язано з умовами релаксації еластомеру в структурі. Отже, непрямий метод визначення контактного тиску може бути застосований при проведенні досліджень з розробки нових компресійних матеріалів та виробів з метою порівняння та вибору найбільш ефективних варіантів. Окрім того, використана методика не потребує наявності спеціального обладнання для визначення тиску, а розривні машини для полотна є в наявності у переважній більшості лабораторій з визначення властивостей текстильних матеріалів.

Висновки. Проведений аналіз методів визначення контактного тиску компресійного трикотажу показав велике різноманіття методик та засобів, серед яких як прямі, що вимірюють саме тиск на межі контакту одягу та тіла людини, так і непрямі методи, які потребують застосування певних формул та рівнянь. За допомогою прямих методів визначають як статичний, так і динамічний тиск, а вимірювання виконують як на манекені (in vitro), так і безпосередньо на людині (in vivo). Кореляція між вимірюваннями in vivo та in vitro є високою, особливо при застосуванні нового покоління манекенів, які з високою точністю імітують будову кісток та тканин тіла. Прямі методи надають найбільш достовірні результати, які залежать також від засобів вимірювання та їх калібрування. Непрямі методи застосовують здебільшого для порівняння медичних компресійних виробів, їх якості та на виробництві.

Проведені дослідження контактного тиску еластичного основов'язаного трикотажу показали, що непрямий метод визначення контактного тиску, який полягає у встановленні значення навантаження при певному видовженні трикотажу та подальшого розрахунку значення тиску за модифікованою формулою Лапласа, не рекомендується до використання при оцінці готових виробів для терапевтичного лікування, однак може бути застосований при проведенні досліджень з розробки нових компресійних матеріалів та виробів з метою порівняння та вибору найбільш ефективних варіантів.

References

1. Kumar, B., Das, A., Alagirusamy, R. (2014). 1 – Introduction to compression therapy. In: Kumar B., Das A., Alagirusamy R., editors. *Science of Compression Bandages*. Woodhead Publishing India. P. 1–19. <https://doi.org/10.1533/9781782422723.1>.
2. Morris, H., Murray, R. (2020). Medical textiles. *Textile Progress*, 52(1–2): 1–127. <https://doi.org/10.1080/00405167.2020.1824468>.
3. Kyzymchuk, O. and Melnyk, L. (2016). Influence of miss knit repeat on parameters and properties of elasticized knitted fabric. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 141(1): 012006. doi: 10.1088/1757-899X/141/1/012006.
4. Kyzymchuk, O., Melnyk, L., Arabuli, S. (2020). Study of Elastic Warp Knitted Bands: Production and Properties. *Tekstilec*, 63(2): 113–123. DOI: 10.14502/Tekstilec 2020.63.113-123.
5. Kankariya, N., Laing, R. M., Wilson, C. A. (2020). Textile-based compression therapy in managing chronic oedema: Complex interactions. *Phlebology*, 36(2): 100–113. <https://doi.org/10.1177/0268355520947291>.
6. Qin, Y. (2016). 8 – Medical bandages and stockings. In: Qin Y., editor. *Medical Textile Materials*. Woodhead Publishing. P. 109–122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100618-4.00008-X>.
7. Rotsch, C., Oschatz, H., Schwabe, D., Weiser, M., Möhring, U. (2011). 22 – Medical bandages and stockings with enhanced patient acceptance. In: Bartels V. T., editor.

Література

1. Kumar B., Das A., Alagirusamy R. 1 – Introduction to compression therapy. In: *Science of Compression Bandages*. Editors B. Kumar at et. Woodhead Publishing India, 2014. P. 1–19. <https://doi.org/10.1533/9781782422723.1>.
2. Morris H., Murray R. Medical textiles. *Textile Progress*. 2020. Vol. 52, № 1–2. P. 1–127. <https://doi.org/10.1080/00405167.2020.1824468>.
3. Kyzymchuk O., Melnyk L. Influence of miss knit repeat on parameters and properties of elasticized knitted fabric. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 141. No. 1. 012006. doi: 10.1088/1757-899X/141/1/012006.
4. Kyzymchuk O., Melnyk L., Arabuli S. Study of Elastic Warp Knitted Bands: Production and Properties. *Tekstilec*. 2020, Vol. 63, Issue 2. P. 113–123.
5. Kankariya N., Laing R. M., Wilson C. A. Textile-based compression therapy in managing chronic oedema: Complex interactions. *Phlebology*. 2020. Vol. 36, № 2. P. 100–113.
6. Qin Y. 8 – Medical bandages and stockings. In: *Medical Textile Materials*. Editor Y. Qin. Woodhead Publishing, 2016. P. 109–122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100618-4.00008-X>.
7. Rotsch C., Oschatz H., Schwabe D., Weiser M., Möhring U. 22 – Medical bandages and stockings with enhanced patient acceptance. In:

Handbook of Medical Textiles. Woodhead Publishing. P. 481–504. <https://doi.org/10.1533/9780857093691.4.481>.

8. Van der Molen, H. R. (1981). The development of phlebology in the last 30 years. *Phlebologie*, 34(3): 313–332.

9. Partsch, H., Clark, M., Bassez, S., Benigni, J. P., Becker, F., Blazek, V. et al. (2006). Measurement of lower leg compression in vivo: recommendations for the performance of measurements of interface pressure and stiffness: consensus statement. *Dermatol Surg*, 32(2): 224–233. doi: 10.1111/j.1524-4725.2006.32039.x.

10. Hegarty-Craver, M., Kwon, C., Oxenham, W., Grant, E., Reid, L. (2015). Towards characterizing the pressure profiles of medical compression hosiery: an investigation of current measurement devices and techniques. *The Journal of The Textile Institute*, 106(7): 757–767. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.941535>.

11. Kumar, B., Das, A., Alagirusamy, R. (2014). 3 – Interface pressure. In: Kumar, B., Das, A., Alagirusamy, R., editors. *Science of Compression Bandages*. Woodhead Publishing India. P. 41–55. <https://doi.org/10.1533/9781782422723.41>.

12. Wang, J. F., Zhong, B. Y., Wang, H. Q. (2019). Measuring garment pressure at any point using a wearable sensor. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14: 8. <https://doi.org/10.1177/1558925019879290>.

13. Kokai, O., Kilbreath, S. L., McLaughlin, P., Dylke, E. S. (2021). The accuracy and precision of interface pressure measuring devices: A systematic review. *Phlebology*, 36(9): 678–694. <https://doi.org/10.1177/02683555211008061>.

14. Partsch, H., Partsch, B., Braun, W. (2006). Interface pressure and stiffness of ready made compression stockings: comparison of in vivo and in vitro measurements. *J Vasc Surg.*, 44(4): 809–814. doi: 10.1016/j.jvs.2006.06.024.

15. Thomas, S. (2014). The production and measurement of sub-bandage pressure: Laplace's Law revisited. *J Wound Care*, 23(5): 234–246. doi: 10.12968/jowc.2014.23.5.234.

Handbook of Medical Textiles. Editor V. T. Bartels. Woodhead Publishing, 2011. P. 481–504. <https://doi.org/10.1533/9780857093691.4.481>.

8. Van der Molen H. R. The development of phlebology in the last 30 years. *Phlebologie*. 1981. Vol. 34, № 3. P. 313–332.

9. Partsch H., Clark M., Bassez S., Benigni J. P., Becker F., Blazek V., Caprini J., Cornu-Thénard A., Hafner J., Flour M., Jünger M., Moffatt C., Neumann M. Measurement of lower leg compression in vivo: recommendations for the performance of measurements of interface pressure and stiffness: consensus statement. *Dermatol Surg*. 2006. Vol. 32, № 2. P. 224–232. doi: 10.1111/j.1524-4725.2006.32039.x.

10. Hegarty-Craver M., Kwon C., Oxenham W., Grant E., Reid L. Towards characterizing the pressure profiles of medical compression hosiery: an investigation of current measurement devices and techniques. *The Journal of The Textile Institute*. 2015. Vol. 106, № 7. P. 757–767. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.941535>.

11. Kumar B., Das A., Alagirusamy R. 3 – Interface pressure. In: *Science of Compression Bandages*. Editors B. Kumar et al. Woodhead Publishing India, 2014. P. 41–55. <https://doi.org/10.1533/9781782422723.41>.

12. Wang J. F., Zhong B. Y., Wang H. Q. Measuring garment pressure at any point using a wearable sensor. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. Vol. 14. P. 8. <https://doi.org/10.1177/1558925019879290>.

13. Kokai O., Kilbreath S. L., McLaughlin P., Dylke E. S. The accuracy and precision of interface pressure measuring devices: A systematic review. *Phlebology*. 2021. Vol. 36, № 9. P. 678–694. <https://doi.org/10.1177/02683555211008061>.

14. Partsch H., Partsch B., Braun W. Interface pressure and stiffness of ready made compression stockings: comparison of in vivo and in vitro measurements. *J Vasc Surg*. 2006. Vol. 44, № 4. P. 809–814. doi: 10.1016/j.jvs.2006.06.024.

15. Thomas S. The production and measurement of sub-bandage pressure: Laplace's Law revisited. *J Wound Care*. 2014. Vol. 23, № 5. P. 234–246. doi: 10.12968/jowc.2014.23.5.234.

16. Kwon, C., Hegarty, M., Oxenham, W., Thoney-Barletta, K., Grant, E., Reid, L. (2018). An indirect testing approach for characterizing pressure profiles of compression bandages and hosiery. *The Journal of The Textile Institute*, 109(2): 256–267. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1340079>.

17. Kumar, B., Das, A., Alagirusamy, R. (2013). Study on interface pressure generated by a bandage using in vitro pressure measurement system. *The Journal of The Textile Institute*, 104(12): 1374–1383. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.807020>.

18. Kyzymchuk, O., Melnyk, L., Bogunova O. (2019) Doslidzhennia tysku elastychnoho osnovov'iazanoho trykotazhu [Investigation of Pressure of Elastic warp knitted fabric]. *Herald of Khmelnytsky National University. Technical Science*, 2(271): 85–90. DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-85-88 [In Ukrainian].

16. Kwon C., Hegarty M., Oxenham W., Thoney-Barletta K., Grant E., Reid L. An indirect testing approach for characterizing pressure profiles of compression bandages and hosiery. *The Journal of The Textile Institute*. 2018. Vol. 109, № 2. P. 256–267. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1340079>.

17. Kumar B., Das A., Alagirusamy R. Study on interface pressure generated by a bandage using in vitro pressure measurement system. *The Journal of The Textile Institute*. 2013. Vol. 104, № 12. P. 1374–1383. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.807020>.

18. Кизимчук О. П., Мельник Л. М., Богунова О. А. Дослідження тиску еластичного основов'язаного трикотажу. *Вісник ХНУ*. 2019. № 2(271). С. 85–90. DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-85-88.

KYZYMCHUK OLENA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8874-8931>
Scopus Author ID: [36140680600](https://orcid.org/0000-0002-8874-8931)
Researcher ID: [D-5159-2017](https://orcid.org/0000-0002-8874-8931)
E-mail: kyzymchuk.o@knuutd.edu.ua

MELNYK LIUDMYLA

PhD, Associate Professor,
Department of Textile Technology and Design
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1104-647X>
Scopus Author ID: [57191415977](https://orcid.org/0000-0003-1104-647X)
E-mail: melnik.lm@knuutd.edu.ua

КИЗИМЧУК Е. П., МЕЛЬНИК Л. М.

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ
КОМПРЕССИОННОГО ТРИКОТАЖА**

Аннотация. Компрессионная терапия является способом лечения венозных язв голени, венозной гипертензии, венозного отека, венозного застоя и других хронических венозных заболеваний. Основным принципом этого лечения является применение определенного давления на ткани, окружающие пораженный участок. В зависимости от величины приложенного давления компрессионная одежда может влиять на внутренний объем вен, артерий и лимфатических сосудов. Таким образом, важной задачей исследования является определение давления, создаваемого компрессионной одеждой на тело.

Цель исследования заключается в анализе существующих методов определения контактного давления компрессионной одежды и обоснованном выборе метода для использования при разработке новых эластичных материалов.

Методика. В работе использован классический метод анализа научной литературы по направлению исследования, а также два метода определения контактного давления компрессионного трикотажа: прямой на аппарате измерения давления MST и косвенный с применением закона Лапласа.

Результаты. Существует множество инструментов и методов, которые можно использовать для измерения контактного давления медицинской компрессионной одежды. Поскольку каждый из них отличается протоколом и используемой аппаратурой, существуют различия в

полученных значениях давления. Прямые методы по сравнению с косвенными дают наиболее достоверные результаты, так как позволяют измерять давление как статическое, так и динамическое не только на манекене (*in vitro*), но и непосредственно на человеке (*in vivo*). Однако данные методы нуждаются в наличии специального оборудования. Проведенные исследования показали, что косвенный метод определения контактного давления, использованный в работе, не рекомендуется к использованию при оценке готовых изделий для терапевтического лечения, однако может быть применен при проведении исследований по разработке новых компрессионных материалов и изделий с целью сравнения и выбора наиболее эффективных вариантов.

Новизна работы заключается в детальном анализе существующих методов определения контактного давления компрессионной одежды, их классификации и оценке эффективности применения как с точки зрения терапевтических услуг, так и с точки зрения разработки новых компрессионных материалов и изделий.

Практическая значимость. По результатам проведенного анализа даны рекомендации по применению косвенного метода определения контактного давления при разработке и исследовании материалов для компрессионных изделий

Ключевые слова: компрессионный трикотаж; контактное давление; закон Лапласа; методы определения давления; нагрузка; удлинение.

KYZYMCHUK O. P., MELNYK L. M.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

MEASUREMENT METHODS FOR CONTACT PRESSURE OF COMPRESSION KNITTED GARMENT

Abstract. Compression therapy is a way to treat venous leg ulcers, venous hypertension, venous edema, venous congestion, and other chronic venous diseases. The main principle of such treatment is the application of a certain pressure on the tissues surrounding the affected area. Depending on the applied pressure level, compression garments can affect the internal veins, arteries, and lymphatics. Thus, determining the pressure created by compression garments on the human body is an important task of the study.

Purpose. The analysis of existing methods for determining the contact pressure of compression garments and the reasonable choice of a method for use in the future development of new elastic materials is the main goal of this research.

Methodology. The classical method of analyzing scientific literature as well as two methods for measuring the contact pressure of compression garments: direct and indirect using Laplace's law have been used in this work.

Findings. There are many tools and methods that can be used to measure the contact pressure of medical compression garments. Since each of them differs by protocol and equipment, there are differences in the obtained pressure values. Direct methods, in comparison with indirect methods, give the most reliable results, since they allow measuring both static and dynamic pressure, not only on a mannequin (*in vitro*), but also directly on a human (*in vivo*). However, these methods require special equipment. The conducted studies have shown that the indirect method used in the work can't be recommended for evaluating finished compression products for therapeutic treatment. However, it can be used in research on the future development of new compression materials and products in order to compare and select the most effective options.

Originality of the work is in a detailed analysis of existing methods for determining the contact pressure of compression garment, their classification, and evaluation of their effectiveness both in terms of therapeutic effect and in terms of new compression materials and product development.

Practical value. The recommendations on an indirect method for determining contact pressure usage in the development and study of materials for compression garments are given based on the analysis results.

Keywords: compression garment; contact pressure; Laplace's law; pressure measurement methods; load; elongation.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування

Кривонос О. О.

Технічний редактор

Панасюк І. В.

Відповідальний за поліграфічне виконання

Підп. до друку 22.06.2022. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 6,96. Облік. вид. арк. 5,46. Наклад 100 пр. Зам. 1769.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, 01011, Україна.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія KB №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Computer Typesetting & Modeling

Kryvonos O. O.

Technical Editor

Panasiuk I. V.

Responsible for printing

Printing proof 22.06.2022. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 6.96. Calculated sheet 5.46. Circulation 100 copies. Order N 1769.

KNUTD Instant Printing Department.
Nemirovich-Danchenko Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate KB №24822–14762 ПР від 19.04.2021 р.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.