

1 (545) 2021

Mining

INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL



INFORMATICS
INFORMATYKA

ELECTRICAL ENGINEERING
ELEKTRONIKA

AUTOMATION
AUTOMATYKA

CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering

AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING
TECHNICAL IT AND TELECOMMUNICATIONS
ENVIROMENTAL ENGINEERING, MINING AND ENERGY TECHNOLOGY
MATERIALS ENGINEERING
QUALITY MENAGEMENT

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ENERGOTECHNIKA
INŻYNIERIA MECHANICZNA
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

MINING – INFORMATICS, AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
Published since 1962

DOI: <https://doi.org/10.7494/miag>

Chairman of the Scientific Board/Przewodniczący Rady Naukowej:
Grzegorz Cieplik, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Secretary of the Scientific Board/Sekretarz Rady Naukowej:
Krzysztof Kotwica, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Members of the Scientific Board/ Członkowie Rady Naukowej:
Dariusz Andriukaitis, Kaunas University of Technology, Kaunas (Lithuania)
Naj Aziz, University of Wollongong, Wollongong (Australia)
Edward Chlebus, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)
George L. Danko, University of Nevada, Reno (USA)
Krzysztof Filipowicz, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Jiří Fries, Technical University of Ostrava, Ostrava (Czech Republic)
Leonel Heradia, EAFIT University, Medellín (Columbia)
Arkadiusz Mężyk, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Josph Molnar, University of Miskolc, Miskolc (Hungary)
Jacek Paraszcak, Laval University, Quebec (Canada)
Sorin Mihai Radu, University of Petrosani, Petrosani (Romania)
Yuan Shujie, Anhui University of Science and Technology, Huainan (China)
Marek Sikora, Institute of Innovative Technologies EMAG, Katowice (Poland)
Radosław Zimroz, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)
Nenad Zrnić, University of Belgrade, Belgrade (Serbia)

Editorial staff/ Redakcja czasopisma:
Editor in Chief/ Redaktor naczelny – *Krzysztof Krauze*
Deputy Editor in Chief/ Zastępca redaktora naczelnego – *Jacek Korsi*
Managing Editor/ Kierownik redakcji – *Kamil Mucha*
Manuscript Editor/ Redaktor techniczny – *Tomasz Wydro*
Web Editor/ Redaktor strony internetowej – *Marcin Nawrocki*

Associate editors/ Redaktorzy tematyczni:
Jarosław Joostberens (automation and robotics/ automatyka i robotyka)
Tomasz Siostrzonek (electrical engineering/ elektronika i energotechnika)
Tomasz Machniewicz (mechanical engineering/ inżynieria mechaniczna)
Ryszard Klempka (technical IT/ informatyka techniczna)
Antoni Wojaczek (telecommunications/ telekomunikacja)
Waldemar Korzeniowski (environmental engineering, mining and energy technology/ inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka)
Kazimierz Drozd (materials engineering/ inżynieria materiałowa)
Patrycja Hąbek (quality management/ nauki o zarządzaniu i jakości)

PUBLISHER

Linguistic Corrector/ Korekta językowa: *Aedden Shaw* (English/ język angielski), *Kamila Zimnicka* (Polish/ język polski)

Desktop Publishing/ Skład komputerowy: *Andre*

Cover Design/ Projekt okładki i strony tytułowej: *ROMEDIA-ART*

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2021, Creative Commons CC-BY 4.0 License

ISSN 2449-6421 (online)
ISSN 2450-7326 (printed)

The electronic version of the journal is the primary one.
Number of copies: 50

Wydawnictwa AGH (AGH University of Science and Technology Press)
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Table of Contents

Andrzej Frączek

Engineering project of a mobile robot with a metal detector for landmine detection	7
Inżynierski projekt mobilnego robota wyposażonego w wykrywacz metalu służącego do detekcji min	16

Paweł Karelus, Krystian Szopa

Design and construction of a three-axis Pick and Place manipulator	25
Projekt i wykonanie trójosiowego manipulatora Pick and Place	37

Aneta Napieraj, Aldona Urbanek, Marek Borowski

Future competences in mining (based on surveys, evaluations and opinions on the project Sectoral Qualifications Framework for Mining)	50
Kompetencje przyszłości w górnictwie (na podstawie badań ocen i opinii dotyczących projektu Sektorowej Ramy Kwalifikacji dla Górnictwa)	58

Bartosz Góralczyk, Wojciech Horak

Design of a machine for trenchless pipe replacement using the static cracking method	66
Urządzenie do bezwykopowej wymiany rur metodą krakingu statycznego	74

ABSTRACTS

ANDRZEJ FRĄCZEK

ENGINEERING PROJECT OF A MOBILE ROBOT WITH A METAL DETECTOR FOR LANDMINE DETECTION

This paper presents the design of a mobile tracked robot capable of moving in varied terrain. Its task is to detect metal objects, which is achieved by means of a metal detector placed on a manipulator with three degrees of freedom. The whole system is controlled from a phone using a dedicated application.

For the mechanical parts, a mathematical model was created, which was used to carry out driver selection and other essential components. For the detector, a description of research carried out to select the coil of the sensory system is presented. In the part related to the control of the robot, the application and the process of testing by means of a station made on a prototype board is presented.

Finally, the assembly of the entire robot is presented along with conclusions and directions for further research.

PAWEŁ KARELUS
KRYSTIAN SZOPA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A THREE-AXIS PICK AND PLACE MANIPULATOR

The article presents the design and implementation of a three-axis Pick and Place manipulator based on OpenPnP software. It is designed for the placement of SMD components on PCB boards. A ready-made frame was used for the project, which required the selection of appropriate motors and the design of the required components for the Z-axis, which were design in Solidworks software. A belt drive was used to construct the manipulator as well as pneumatic components for lifting the SMD parts. Appropriate cameras were also selected and configured along with lighting, allowing the software to automatically check the progress of the machine. The next step was to select the electronic components of the machine and configure them. Then OpenPnp software was configured and prepared for the automatic placement of SMD components.

ANETA NAPIERAJ
ALDONA URBANEK
MAREK BOROWSKI

FUTURE COMPETENCES IN MINING (BASED ON SURVEYS, EVALUATIONS AND OPINIONS ON THE PROJECT SECTORAL QUALIFICATIONS FRAMEWORK FOR MINING)

One of the stages of work on the Sectoral Qualifications Framework for Mining (SQFM) was to verify its initial design as a result of quantitative research using questionnaires and qualitative research through in-depth interviews (IDI). Their main goal was to identify the opinions and attitudes of respondents related to the mining industry towards the implemented SQFM project. Both people working in mining plants and in other companies and units

STRESZCZENIA

ANDRZEJ FRĄCZEK

INŻYNIERSKI PROJEKT MOBILNEGO ROBOTA WYPOSAŻONEGO W WYKRYWACZ METALU SŁUŻĄCEGO DO DETEKЦИИ MIN

W artykule przedstawiono projekt mobilnego robota gąsienicowego wykonanego w ramach pracy inżynierskiej, mogącego poruszać się w zróżnicowanym terenie. Jego zadaniem jest wykrywanie metalowych przedmiotów, co jest realizowane za pomocą wykrywacza metalu umieszczonego na manipulatorze o trzech stopniach swobody. Całość sterowana jest z poziomu telefonu za pomocą dedykowanej aplikacji.

Całość prac projektowych została podzielona na trzy segmenty. Dla części mechanicznych (platforma mobilna, manipulator) sformułowano model matematyczny obiektu, na podstawie którego dokonano obliczeń i doboru napędów oraz innych niezbędnych komponentów. Dla wykrywacza przedstawiono opis badań prowadzonych pod kątem doboru cewki układu sensorycznego. W części związanej ze sterowaniem robota została zaprezentowana aplikacja oraz proces testowania za pomocą stanowiska wykonanego na płycie prototypowej.

Na zakończenie przedstawiono złożenie całego robota wraz z podsumowaniem wykonanych prac, wnioskami i kierunkami dalszych badań.

PAWEŁ KARELUS
KRYSTIAN SZOPA

PROJEKT I WYKONANIE TRÓJOSIOWEGO MANIPULATORA PICK AND PLACE

W artykule przedstawiono projekt i wykonanie trójosiowego manipulatora Pick and Place, który oparty został na oprogramowaniu OpenPnP. Przeznaczony jest on do układania elementów SMD na płytkach PCB. Do wykonania projektu użyto gotowej ramy, która wymagała doboru odpowiednich silników i zaprojektowania wymaganych elementów dla osi Z, które zostały wykonane w programie Solidworks. Do skonstruowania manipulatora zastosowano napęd oparty na przekładni pasowej, jak i elementy pneumatyczne służące do podnoszenia komponentów. Dobrano i skonfigurowano również odpowiednie kamery wraz z oświetleniem, pozwalające na automatyczne sprawdzanie przebiegu pracy maszyny przez oprogramowanie. Kolejnym krokiem był dobór elementów elektronicznych maszyny i ich konfiguracja. Następnie skonfigurowano oprogramowanie OpenPnp i przygotowano je do automatycznego układania elementów SMD.

ANETA NAPIERAJ
ALDONA URBANEK
MAREK BOROWSKI

KOMPETENCJE PRZYSZŁOŚCI W GÓRNICTWIE (NA PODSTAWIE BADAŃ OCEN I OPINII DOTYCZĄCYCH PROJEKTU SEKTOROWEJ RAMY KWALIFIKACJI DLA GÓRNICTWA)

Jednym z etapów prac nad Sektorową Ramą Kwalifikacji dla Górnictwa (SKRG) było dokonanie weryfikacji jej wstępnego projektu w wyniku przeprowadzenia badań ilościowych z wykorzystaniem ankiet i badań jakościowych za pośrednictwem wywiadów pogłębionych (IDI). Ich zasadniczym celem było rozpoznanie opinii i postaw respondentów związanych z branżą górniczą wobec wdrażanego projektu SRKG. Do wzięcia udziału w przedsięwzięciu

related to the mining sector were invited to take part in the project. The expected result of the conducted research was the collection of material allowing for the verification of the provisions in terms of the needs and expectations of employers as to the qualifications of the employed employees and the assessment of the legitimacy of the proposed solutions.

In designing the research, the use of qualitative and quantitative methods was assumed. This made it possible to triangulate the data – looking at the studied research problems from different perspectives, which was to influence the obtaining of empirical material allowing for the analysis of the discussed problems taking into account various points of view. As a result, the image of the needs in the area of increasing competences and the main deficits in the mining sector has crystallized.

*BARTOSZ GÓRALCZYK
WOJCIECH HORAK*

DESIGN OF A MACHINE FOR TRENCHLESS PIPE REPLACEMENT USING THE STATIC CRACKING METHOD

Efforts to minimize surface disturbances during earthworks are an important aspect of modern civil engineering. These expectations are met by a number of technologies that make it possible to carry out such works using trenchless technologies. The static cracking method makes it possible to extend, modernize or renovate the existing underground infrastructure. The paper presents the design of a device assigned for trenchless pipe replacement using the static cracking method. The developed device is characterized by the use of a new type of drive system with the use of articulated rods. In addition, the work proposes ways to solve the main issues in the design of this type of device.

zaproszono zarówno osoby pracujące w zakładach górniczych, jak i w innych firmach oraz jednostkach związanych z sektorem górnictwa. Oczekiwanym rezultatem zrealizowanych badań było zebranie materiału pozwalającego na weryfikację zapisów pod kątem potrzeb i oczekiwań pracodawców co do kwalifikacji zatrudnianych pracowników oraz ocena zasadności proponowanych rozwiązań. W projektowaniu badań założono wykorzystanie metod o charakterze jakościowym oraz ilościowym. Umożliwiło to triangulację danych – spojrzenie na analizowane problemy badawcze z różnych perspektyw, co wpłynąć miało na uzyskanie materiału empirycznego pozwalającego na analizę poruszanych problemów z uwzględnieniem zróżnicowanych punktów widzenia. W efekcie wykrystalizował się obraz potrzeb w obszarze podnoszenia kompetencji oraz głównych deficytów w sektorze górnictwa.

*BARTOSZ GÓRALCZYK
WOJCIECH HORAK*

URZĄDZENIE DO BEZWYKOPOWEJ WYMIANY RUR METODĄ KRĄKINGU STATYCZNEGO

Dążenie do minimalizacji zaburzeń ładu powierzchniowego podczas prowadzenia prac ziemnych stanowi ważny aspekt współczesnej inżynierii lądowej. Naprzeciw tym oczekiwaniom wychodzą różne technologie umożliwiające prowadzenie tego typu prac z wykorzystaniem metod bezwykopowych. Metoda krąkingu statycznego umożliwia rozbudowę, modernizację lub rehabilitację istniejącej infrastruktury podziemnej. W pracy przedstawiono projekt urządzenia przeznaczonego do bezwykopowej wymiany rur metodą krąkingu statycznego. Opracowana konstrukcja wyróżnia się zastosowaniem nowego typu układu napędowego z wykorzystaniem żerdzi przegubowych. Ponadto w pracy zaproponowano sposoby rozwiązania głównych zagadnień konstrukcji tego typu urządzenia.

ANDRZEJ FRĄCZEK

Engineering project of a mobile robot with a metal detector for landmine detection

This paper presents the design of a mobile tracked robot capable of moving in varied terrain. Its task is to detect metal objects, which is achieved by means of a metal detector placed on a manipulator with three degrees of freedom. The whole system is controlled from a phone using a dedicated application. For the mechanical parts, a mathematical model was created, which was used to carry out driver selection and other essential components. For the detector, a description of research carried out to select the coil of the sensory system is presented. In the part related to the control of the robot, the application and the process of testing by means of a station made on a prototype board is presented. Finally, the assembly of the entire robot is presented along with conclusions and directions for further research.

Key words: *mobile robot, manipulator, metal detector, Bluetooth app*

1. INTRODUCTION

In the 20th century, a number of conflicts took place in Europe and the Middle East: with among the most notable being World War I and II, the war in Afghanistan, and the conflict in the former Yugoslavia. This led to an increase in the use of mines, guns, aircraft and many other military items.

One of the most unpredictable threats are mines. According to Hemapala [1], up to 100,000,000 anti-personnel mines have been deployed worldwide by various military units and terrorist organisations. Cheap to produce, invisible to the enemy, they can cause horrific damage.

Unfortunately, when the warring parties exit the area of operations, usually at the end of a conflict, they leave behind many dangerous explosives which pose a threat to the civilian population. The process of clearing such areas is extremely time-consuming. It requires the use of qualified personnel with modern equipment and the clearing operation itself is a life and health-threatening activity for the operator. In Poland alone, naval units carry out 300 interventions a year in the coastal zone to neutralise mines and explosives that could pose a threat to civilians [2].

Simultaneously many have recognised the possibility of using remotely controlled machines to neutralise

a variety of explosives. Robots provide a safer and more secure solution for the operator. Such constructions are now the basis for sappers in modern armed conflicts.

Many of these designs were developed in collaboration with the military segment. They can be divided into two types. The first is an infantry support vehicle (a perfect example is MATILDA robot used by American soldiers during the Iraqi conflict [3]). The second category are robot prototypes designed to operate in harsh environments such as water. A description of these structures (ARIEL or BUR-001) was presented in Jankiewicz [4].

At the same time, prototypes of structures designed to clear the area and allow civilians to return are being built in universities around the world. These include the DYLEMA walking-robot with hexapod configuration [5], a five degrees of freedom manipulator mounted on a remote controlled commercially available 4-wheeled ATV GRYPHON [6] or solar-powered mobile metal detector robot [7].

However, such structures are extremely expensive to manufacture and operate. The problem of unexploded ordnance/mines unfortunately affects the whole globe (often in countries just recovering from conflicts and which cannot afford expensive equipment). Engineers from such countries (e.g. Pakistan)

are trying to find a remedy, a result of which is the MARWA robot [8].

These were aspects that motivated the design of a low-cost robot that could help identify and clear dangerous areas. Such a solution would be more achievable for poorer countries and could prevent unnecessary injuries.

2. MECHANICAL PART

The objectives for the mobile platform were as follows:

- the ability of the robot to move in both terrain (grass, sand) and urban parts (paving stones, asphalt),
- ease in overcoming uneven terrain,
- the lowest possible impact on the ground structure (to prevent deformation of the terrain).

Based on an analysis of the classic solutions available on the market, a tracked system was chosen (Fig. 1).

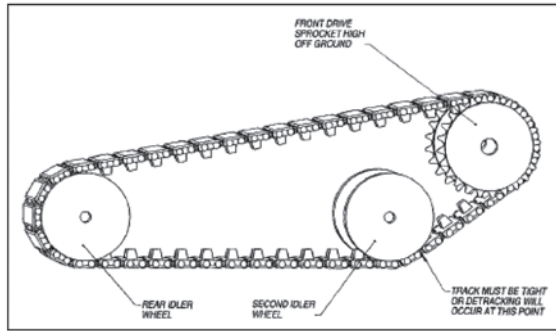


Fig. 1. Tracked vehicle drivetrain [9]

The biggest advantage of this type of locomotion (over wheeled suspension) is the possibility of operating in difficult terrain (mud, snow). The meshing length is considerably longer than that of the wheel tyres of a wheeled vehicle, so that only on extremely soft ground can the track slip in relation to the ground [10].

In addition, thanks to the continuous tracks, the surface pressure is at a lower level. A modern M1A2 Abrams tank with a weight of nearly 72 tons equipped with such a system has a similar pressure as a man standing on one leg (82 kPa) [9].

In addition, a discussion was held regarding the type of suspension of the robot. The robot is expected to operate on undulating terrain full of rocks and vibrations may have an adverse effect. Due to the nature of the robot's work (low speed of movement is

preferred in order to increase the accuracy of the search) a solution with rigid wheels will be used.

According to Sandin [9], the phenomenon of vibration at low speeds disappears, so this variant can easily be used in this project.

The next move was to formulate the mathematical model, and this needed to be divided into two segments:

- kinematics and dynamics of the continuous tracks,
- mechanics of the tracked vehicle.

Each of these has a different but significant impact on the movement of the entire mobile platform.

Upon first consideration, we can think of the caterpillar track as a flexible, inextensible belt. It constitutes a circumference defined by a non-deformable substrate, a driving and tensioning wheel and support wheels. Each point of the caterpillar circumference participates in two movements:

- relative to the road on which the vehicle is moving,
- relative to the vehicle.

The first factor affecting the platform is skidding. It occurs when the vehicle speed differs from the relative speed. This quantity is described by the slip coefficient:

$$s = 1 - \frac{v}{v_R} \quad (1)$$

where:

v – vehicle speed [m/s],

v_R – speed of the point on the perimeter of the track [m/s].

For the purposes of the following considerations, the caterpillar model was changed into separate components that affect its motion. Using the considerations carried out in Burdzinski [11], the concept of average speed is introduced. This is due to the fact that the angular velocity of the driving wheel is variable. This is influenced by the fact that the tracked vehicle is a dynamic system operating on non-uniform ground. In addition, the finite pitch length of the track is an influence. The formula for the average speed v_{sr} [m/s] is as follows:

$$v_{sr} = t_g n_k z (1 - s) \quad (2)$$

where:

t_g – track scale [m],

z – number of drive wheel teeth,

n_k – number of revolutions of the drive wheel [rad/s].

The last thing to consider is the efficiency of the track. Friction losses occur during the relative movement of two adjacent links. These depend on the track tension, centrifugal forces and driving torque. The formula itself is very complicated and in Burdzinski [11] an alternative, formula of efficiency coefficient is used to simplify calculations:

$$\eta_g = 0.95 - 0.005v_{sr} \quad (3)$$

The next move was to form a model for the whole platform.

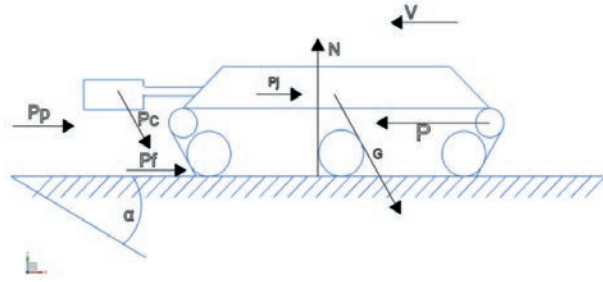


Fig. 2. Forces acting on the vehicle

Figure 2 shows the forces acting on a vehicle moving up a hill with an angle to the vertical of α . These are:

- P – driving force [N],
- N – ground reaction force [N],
- P_p – aerodynamic drag force [N],
- P_f – rolling resistance [N],
- P_c – weight of the coil [N],
- G – weight of the robot [N],
- P_j – inertia force [N].

The following forces will be discussed below:

- 1) Gravity force of the robot – is applied at the centre of gravity. It includes the masses of both the body itself and the manipulator with coil.
- 2) Rolling resistance – for tracked vehicles the description of this force is complex, therefore according to Burdzinski [11] this force can be described by the equation:

$$P_f = f(G + P_c)\cos\alpha \quad (4)$$

where f – rolling resistance coefficient.

- 3) Ground reaction force – in the robot is the resultant force of the ground action on the lower crawler belt. The value can be determined from the equation:

$$N = (G + P_c)\cos\alpha \quad (5)$$

- 4) Aerodynamic drag force – this is a result of air acting on the geometry of the vehicle and can be expressed by the formula:

$$P_p = \rho c A v^2 \quad (6)$$

where:

- ρ – air density [kg/m^3],
- c – aerodynamic drag coefficient,
- A – reference area [m^2].

- 5) Inertia force – occurs for a non-inertial reference system and is applied at the centre of gravity of the vehicle, and its formula is:

$$P_j = (G + P_c) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

- 6) Driving force – arises as a result of the drive system. For unsteady motion, this formula has the equation:

$$P = \frac{M_k}{r_k} \eta_g - \frac{M_j}{r_k} \quad (8)$$

where:

- M_k – torque from the drive wheel [Nm],
- r_k – drive wheel radius [m],
- M_j – the tangential moment of inertia of all rotating parts of the track with respect to the drive wheel axis [Nm].

Finally, after ordering and introducing assumptions, the formulas can be obtained:

- 1) For uniform rectilinear motion, the members containing dv/dt . In addition, for assumed speeds of motion, the effect of air resistance can be neglected and the equation is of the form:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f(G + P_c)\cos\alpha + (G + P_c)\sin\alpha \quad (9)$$

- 2) For moving on flat terrain, the angle α equals 0, so:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f(G + P_c)\cos\alpha \quad (10)$$

Once the equations are derived, calculations will be made for the minimum torque that needs to be delivered to the drivetrain. The assumptions are to move at a speed of 0.4 m/s on a gradient of 10 degrees (for normal roads this corresponds to a percentage gradient of 17.63%. For comparison, the highest hills in the Alps are 32% [11]).

In addition, it is still necessary to assume a safety factor. In the literature it is 1.15 for a vehicle with a constant load [11]. However, since this is a pioneering design, the safety factor $n = 1.4$ was adopted. The final moment obtained is:

$$M_k = 0.56 \text{ Nm} \quad (11)$$

For this moment, the following were selected:

- caterpillar tracks system,
- Pololu brand DC motors,
- dedicated controllers for the motors,
- fans to cool the systems.

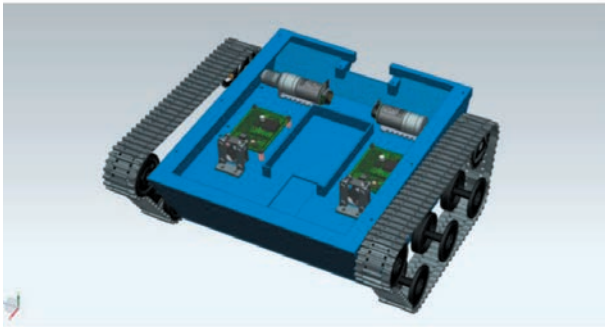


Fig. 3. CAD model of the mobile platform

To verify that all the components will fit correctly in the robot body, a suspension model was made with the components already selected, which is shown in Figure 3. The body is prepared to be fabricated using 3D printing technology.

The next step was the construction of the manipulator. The following requirements were set:

- possibility of carrying out measurements at a precisely defined height above the ground,
- “sweeping” operations (sensing a larger area for a single robot position).

A manipulator with the first three degrees of freedom (DOF) will be used in this project because these are sufficient to meet the above design objectives. This is because they are concerned with moving the coil in space and not positioning it relative to the ground.

After completing the analysis of the most common kinematic structures, the RRR (rotating anthropomorphic manipulator arm) structure will be used because it is characterised:

- universal application,
- large working area,
- reliability.

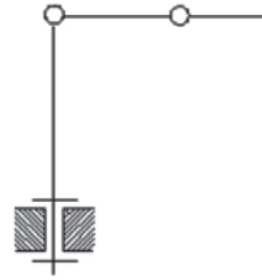


Fig. 4. Rotating anthropomorphic manipulator arm [12]

It also has disadvantages such as the high cost of a highly repeatable manipulator, but for ground search operations this is unnecessary and would generate additional costs.

In the next phase the Denavit–Hartenberg notation was used to obtain the uniform transformation matrix:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 & s_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & a_2 s_2 + a_3 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Based on this and the complex points to be reached by the manipulator, the lengths of the manipulator members were selected. For this, the method developed in the work of Siciliano, Sciavicco, Villani and Oriolo was used [13].

The next step was the selection of drives. A mathematical model was formulated for each member separately and the torque required to move that member and servo was calculated based on that model (Fig. 5).

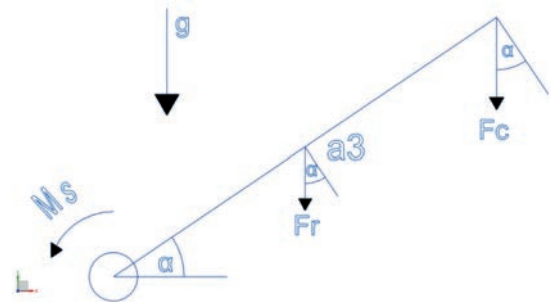


Fig. 5. Forces acting on third arm

In the last part, the goal was to make a CAD model of the individual components and the assembly with the servos. The finite element method analysis was performed for the manipulator thus prepared. The assembly of the whole element is presented in Figure 6.



Fig. 6. CAD model of the manipulator

The material from which the manipulator components will be made is ABS plastic. The use of plastic which can be used as a filament in the 3D printer of FDM type has a number of advantages:

- when using metal as a construction material, the measuring system which is supposed to detect metal in the environment is disturbed – this is a key feature,
- ABS plastic used in printers is characterized by high strength and resistance to weather conditions.

3. ELECTRONIC PART

The system that is mainly used when searching for metal in the ground is a metal detector. This system operates using Faraday's law and the generalized Ampere's law.

According to Halliday, Walker and Resnick [14], Faraday's law is formulated as follows: "An electric field is induced by the time-varying flux of a magnetic field".

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

where:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \text{ – rate of change in magnetic flux [Wb/s],}$$

$$E \text{ – electromotive force [V].}$$

According to Halliday, Walker and Resnick [14], Ampere's generalized law is formulated as follows: "The source of a magnetic field is an electric current or a time-varying electric field flux".

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I \quad (14)$$

where:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} \text{ – the closed line integral of the magnetic field around a closed curve [T],}$$

$$\mu_0 \text{ – vacuum permeability [H/m],}$$

$$\epsilon_0 \text{ – vacuum permittivity [F/m],}$$

$$\frac{d\Phi_E}{dt} \text{ – rate of change in electric flux [Vm],}$$

$$I \text{ – electric current [A].}$$

The detector generates a magnetic field by means of an electrical circuit. The sensor starts to fulfil its task when it is in an area where electromagnetic waves start to interact with conductive material, e.g. in the ground. An electromotive force is then induced in the object (Faraday's law). So-called eddy currents begin to form, which are the cause of the induced magnetic field (generalised Ampere's law). The new magnetic field starts to act on the coil. Current starts to flow and is registered by the detector's measuring system.

The properties of the second field depend on many parameters. These include the geometry of the object itself (distance from the detector, orientation towards it), material properties (shape, size, conductivity, magnetic permeability). The size and shape of the coil itself are also very important as shown in Figure 7.

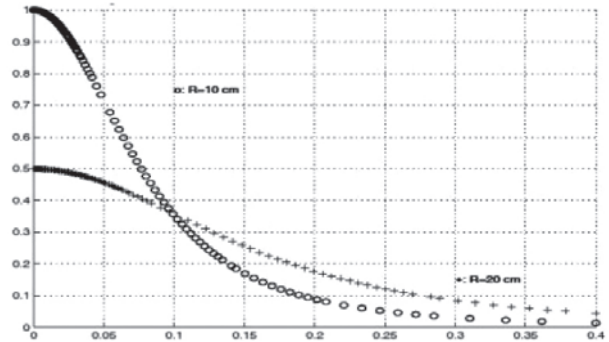


Fig. 7. Dependence of the magnetic field for two different coil sizes [15]

The normalized graph above shows the dependence of the magnetic field on the distance d [m] from them for two different coil sizes (10 cm and 20 cm). The normalisation was carried out for the smaller coil at a distance $d = 0$ [15].

There are several types of metal detectors on the market. After the analysis of metal detector types, the PI (Pulse Induction) type was selected.

These sensors work by regularly generating electrical pulses sent to the probe. When the electrical pulse disappears, the magnetic field on the probe disappears. The time it takes for the field to disappear

depends on whether there is a metal present. If there is, the field fades much more slowly which can be detected. Its advantages are:

- no sensitivity to soil mineralisation,
- simple design (only one probe needed).

Making a metal detector yourself is difficult. The number of variables affecting the operation is large, so the cost of ready-made detectors starts at 300 zloty (65 euro). In addition, one of the objectives was to take measurements, making different coils in order to find the optimal value of parameters such as diameter and number of coils. The kit called J-297 for self-assembly by Jabel company was used.

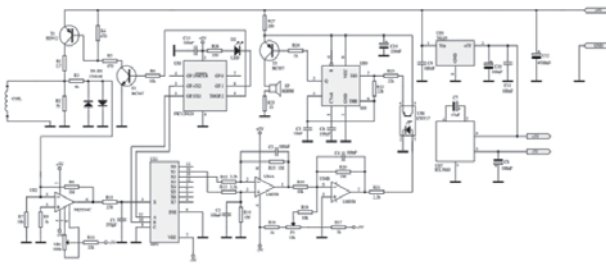


Fig. 8. Metal detector board Jabel J-297

As mentioned earlier, a lot depends on the parameters of the detector coil and thus for this purpose it was planned to carry out measurements. The purpose of the analysis was to optimize the coil dimensions (which depend on two parameters):

- number of coil windings,
- coil diameter.

The goal was to keep the weight as low as possible while obtaining the best metal detection results.

Due to the selected target dimensions of the robot, two coil diameters were chosen to be used for optimization: 10 cm and 12 cm. A suitable “pad” (a 3D print-out consisting of a base and a number of vertical columns used to facilitate the coil winding process) on which coils was made with the parameters shown in Table 1.

Table 1
Prepared coils

Coil number	Coil diameter [cm]	Number of turns	Weight [g]
1	10	50	46.9
2	10	70	65.6
3	10	95	89.0
4	12	40	45.0
5	12	60	67.5

Two measurement sites were selected:

- Bulgarian lev 1 coin (diameter 24.5 mm, thickness 1.9 mm),
- metal can 0.33 l of a well-known cola beverage producer (height 116 mm, width 66 mm, depth 66 mm).

A measurement rig was made for the measurements (Fig. 9). The object is placed on a printed platform which is moved up and down by a string which forms a straight line by means of a block. When the detector detects a coin, the string can be restrained by weaving it several times through the printed piece located on the bottom shelf of the table. This eliminates the error caused by hand trembling.



Fig. 9. Measuring stand for a coin

The following brief plan was adopted for making measurements:

- 1) turning on the detector,
- 2) calibrating the locator,
- 3) take 5 measurements,
- 4) turn off the locator.

For each object this procedure was repeated 3 times. The measurement results are shown in the following Table 2 and the symbol descriptions are:

- mean value: μ [cm],
- standard deviation: σ [cm].

Using all the measurements taken, a 12 cm 60 turns coil was finally selected.

The way the operator communicates with the robot is also an important issue. Design assumptions:

- simplicity of operation,
- lack of autonomy of the robot (the user controls the movement of the robot).

Table 2
Summary of measurement results

Coil	μ can [cm]	σ can [cm]	μ coin [cm]	σ coin [cm]
1	25.91	2.29	11.33	0.15
2	25.69	0.93	12.14	0.3
3	26.52	2.9	13.66	0.5854
4	26.13	1.64	14.12	0.42
5	29.73	1.19	60.0	0.27

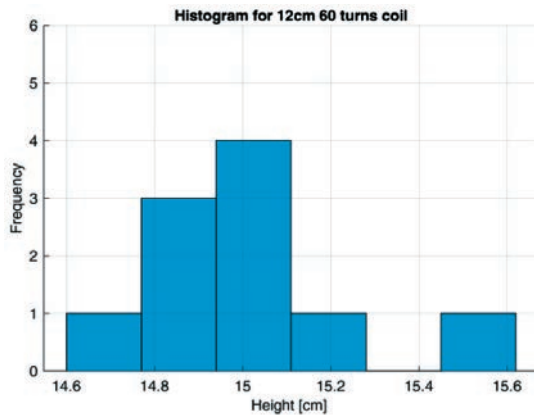


Fig. 10. Example histogram from measurements

The Bluetooth standard was chosen. BLE (Bluetooth Low Energy) ensures very low energy consumption and a range of up to 20 m.

In addition, it is possible to create a dedicated application for Android phones, which can be developed on an on-going basis.

The application was written on appinventor.mit.edu. This website allows you to write Android applications without using conventional programming languages. In this environment, applications are executed using blocks corresponding to specific actions (e.g. sending a single-bit signal using Bluetooth).

After creating all the necessary functions, the application was compiled and saved as a file with the extension .app. This file is supported by most of the currently popular phone brands. The appearance of the application after installation on the phone is shown in Figure 11.

The code created for the operation of the microcontroller itself was written in Arduino IDE environment. The library “Servo” was used. The design of the program itself is based on *switch...case* commands to ensure the readability and clarity of the code. For the purposes of testing the Android application, a test bench was made using a prototype board and manipulator (Fig. 12).

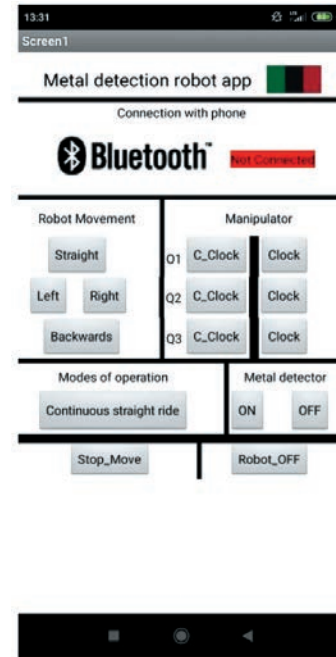


Fig. 11. Screenshot of the application from a private phone

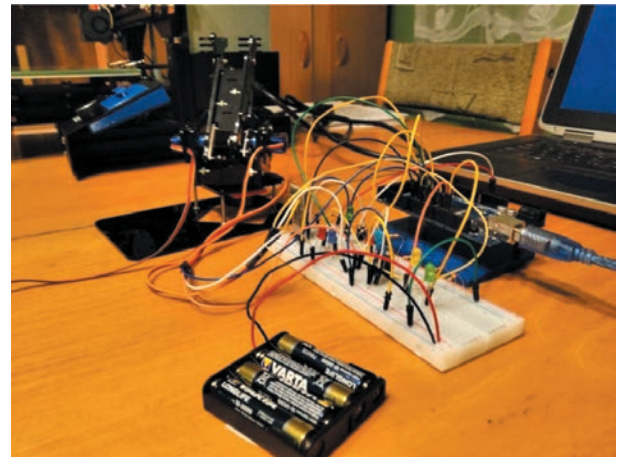


Fig. 12. Mobile application test bench

The signalling of individual functions for the mobile platform and the detector was realised by means of LEDs. This allows for a cheap and easy way to test the communication of these functions.

At the end, a control board was selected. The Arduino Mega microcontroller will be used to control the whole system (Fig. 13).

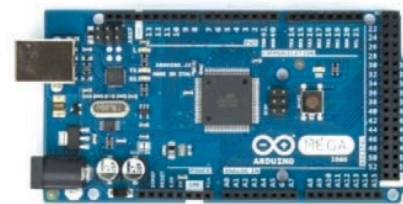


Fig. 13. Arduino Mega

It is widely available on the market, offering an affordable price and a large number of ports for connecting peripheral elements which is shown in Figure 13.

4. ROBOT ASSEMBLY

With the work completed and all the important electrical components selected, the final step was to select the power supply and inverters that would ensure that adequate voltage was continuously supplied to the motors and servos. The Li-Pol cell was chosen because it is commonly used in robotics. The converters, on the other hand, were selected from the Pololu company catalogue.

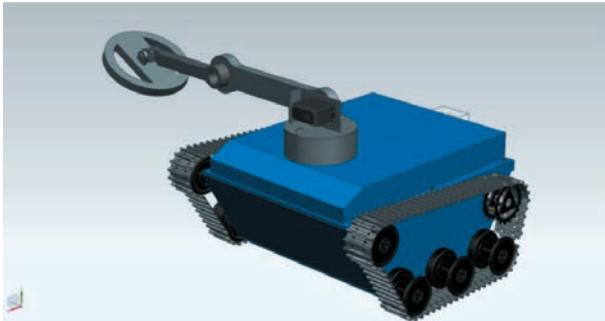


Fig. 14. CAD model of the robot – front side view

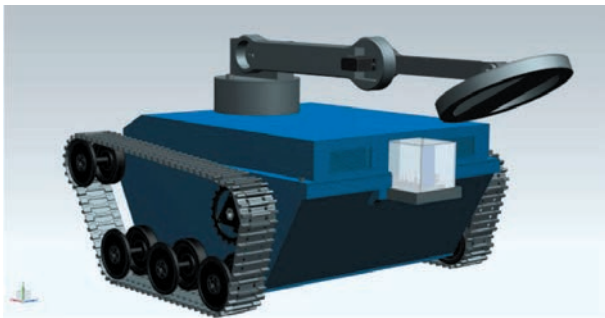


Fig. 15. CAD model of the robot – rear side view

After selecting all the components, the whole robot was assembled and is depicted in Figures 14 and 15. The whole robot weighs about 3.5 kg.

5. SUMMARY

The goal that was set before the work started, i.e. the design of the robot, has been achieved. Thanks to such an extensive scope of work, it was possible to apply the knowledge acquired during the first degree

studies. Detailed issues included mechanics, drive selection, manipulator kinematics, metal detector testing and programming.

At the same time, this is a project. Its full verification will only be possible when the robot itself is built. Exploitation and tests of the prototype may generate situations that cannot be foreseen at the stage of creation of assumptions and design. However, this does not mean that the design phase can be neglected. During this phase, costly mistakes can be avoided which would otherwise only be discovered at further stages of the project and would result in the need to change the construction and entail additional costs.

In addition, after becoming familiar with solutions present on the market, it is worth considering whether it would be a good idea to enrich the robot design with additional functions. In most designs there is a gripper at the end of the manipulator, which allows positioning the sensory system in relation to the curvature of the ground.

Another important thing would be to test the detector for objects in the soil. The Jabel system has met its objectives for tests in the air, but its performance can significantly deteriorate when searching in the ground, so it is worth checking its performance in this area. Additionally, in the electronics part, the addition of ultrasonic cameras/sensors could be considered to increase the autonomy of the robot.

In the software part, the tests carried out on the prototyping board allowed us to stabilise the communication with the Bluetooth module, but it was impossible to reproduce in 100% the functioning of the robot. One of the most important things is the encoder, which is placed in the motors responsible for controlling the mobile platform. It is an extremely valuable element as it allows precisely controlling the robot and improving the smoothness of the system itself (a regulator can be used). It was not possible to test this on the prototype board, so until possible tests on the robot prototype it is necessary to include encoders in the robot control algorithm.

6. CONCLUSIONS

The intended outcome of the exploration robot design has been achieved. In future work, its further development and practical implementation is needed to obtain fully functional metal detector robot.

References

- [1] Hempala U.M.: *Robots for Humanitarian Demining*. InTech, 2017.
- [2] Chmieliński M.: *Bezpieczeństwo neutralizacji niewypałów i niewybuchów amunicji artyleryjskiej w strefie przybrzeżnej*. Autobusy 2017, 6: 99–106.
- [3] Munkeby S., Jones D., Bugg G., Smith K.: *Applications for the MATLIDA Robotic Platform*. Proceedings SPIE 2002, 4715, 206–2013.
- [4] Jankiewicz M.: *Przeciwwinowe roboty – pojazdy kroczące*. Biuletyn WAT 2017, 56: 273–286.
- [5] Gonzalez de Santos P., Garcia E., Estemera J., Armada M.A.: *DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location*. International Journal of Systems Science 2005: 545–558.
- [6] Fukushima F. E., Freese M., Matsuzawa T., Aibara T., Hirose S.: *Humanitarian demining robot Gryphon current status and an objective evaluation*. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems 2017: 735–753.
- [7] Albert F.Y.C., Mason C.H.S., Kiing C. K. J., Ee K.S., Chan K.W.: *Remotely operated solar-powered mobile metal detector robot*. Procedia Computer Science 2014, 42: 232–239.
- [8] Abubakr M., Syed M.A., Talha M., Adnan M., Syed A.A., Mhequb H., Ali A., Mian A.M.: *Marwa: A Rough Terrain Landmine Detection Robot For Low Budget*. Proceedings of the 43rd International Symposium on Robotics, London 2012.
- [9] Sandin P.: *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. McGraw Hill, New York 2003.
- [10] Rybak P.: *Tracked or wheeled chassis*. Journal of KONES Powertrain and Transport 2007, 3: 527–536.
- [11] Burdziński Z.: *Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
- [12] Buratowski T.: *Teoria robotyki*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2012.
- [13] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo.: *Robotics Modeling, Planning and Control*. Springer, London 2010.
- [14] Halliday D., Walker J., Resnick R.: *Podstawy fizyki. Tom 3*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [15] Bruschini C.: *A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining*. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussels 2002.

ANDRZEJ FRĄCZEK, Eng.
AGH University of Science and Technology
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
anfracze@student.agh.edu.pl

ANDRZEJ FRĄCZEK

Inżynierski projekt mobilnego robota wyposażonego w wykrywacz metalu służącego do detekcji min

W artykule przedstawiono projekt mobilnego robota gasienicowego wykonanego w ramach pracy inżynierskiej, mogącego poruszać się w zróżnicowanym terenie. Jego zadaniem jest wykrywanie metalowych przedmiotów, co jest realizowane za pomocą wykrywacza metalu umieszczonego na manipulatorze o trzech stopniach swobody. Całość sterowana jest z poziomu telefonu za pomocą dedykowanej aplikacji.

Całość prac projektowych została podzielona na trzy segmenty. Dla części mechanicznych (platforma mobilna, manipulator) sformułowano model matematyczny obiektu, na podstawie którego dokonano obliczeń i doboru napędów oraz innych niezbędnych komponentów. Dla wykrywacza przedstawiono opis badań prowadzonych pod kątem doboru cewki układu sensorycznego. W części związanej ze sterowaniem robota została zaprezentowana aplikacja oraz proces testowania za pomocą stanowiska wykonanego na płycie prototypowej.

Na zakończenie przedstawiono złożenie całego robota wraz z podsumowaniem wykonanych prac, wnioskami i kierunkami dalszych badań.

Słowa kluczowe: robot mobilny, manipulator, wykrywacz metalu, aplikacja bluetooth

1. WPROWADZENIE

W XX wieku zarówno na terenie Europy, jak i Bliższego Wschodu miało miejsce szereg konfliktów zbrojnych: I i II wojna światowa, wojna w Afganistanie, wojna na terenie byłej Jugosławii. Spowodowało to wzrost użycia min, pistoletów, samolotów i wielu innych przedmiotów z arsenału armii.

Jednym z najbardziej nieprzewidywalnych zagrożeń stanowią miny. Według Hemapali [1] nawet 100 000 000 min przeciwpiechotnych zostało rozmieszczonych na całym świecie przez różne jednostki wojskowe i organizacje terrorystyczne. Tanie w produkcji, niewidoczne dla wroga mogą wyrządzić przerażające straty.

Niestety, zazwyczaj po zakończeniu konfliktu zwaśnione strony opuszczają tereny działań, pozostawiając po sobie wiele niebezpiecznych materiałów wybuchowych. Stanowią one zagrożenie dla ludności cywilnej. Sam proces oczyszczania takich terenów jest niezwykle czasochłonny. Wymagane jest użycie wykwalifikowanego personelu wyposażonego w nowoczesny sprzęt, a sama operacja oczyszczania gruntu jest czynnością zagrażającą życiu i zdrowiu operatora. W sa-

mej Polsce oddziały Marynarki Wojennej przeprowadzają około 300 interwencji na rok, których celem jest neutralizacja niewybuchów stanowiących zagrożenie dla ludności cywilnej [2].

Jednocześnie wiele osób dostrzegło możliwość wykorzystania zdalnie sterowanych maszyn w celu neutralizacji różnorodnych materiałów wybuchowych. Roboty są rozwiązaniem pewniejszym i bezpieczniejszym dla operatora. Tego typu konstrukcje stanowią obecnie podstawę do działania saperów we współczesnych konfliktach zbrojnych.

Wiele z takich konstrukcji powstało we współpracy z przemysłem zbrojeniowym. Można je podzielić na dwa różne segmenty. Pierwszy z nich to pojazdy stanowiące wsparcie dla wojsk lądowych (przykładem takiej konstrukcji jest robot MATILDA używany przez armię USA w trakcie konfliktu w Iraku [3]). Druga kategoria to eksperymentalne konstrukcje przeznaczone do działania w ciężkim środowisku, np. wodnym. Opis takich projektów (ARIEL czy BUR-001) został zaprezentowany w pracy M. Jankiewicza [4].

Jednocześnie badacze z różnych uniwersytetów opracowują własne konstrukcje koncentrujące się na

samym procesie detekcji min tak, aby oczyścić zaminowane tereny i umożliwić tam powrót ludności cywilnej. Tego typu konstrukcje to robot kroczący w konfiguracji hexapod DYLEMA [5], pięcioosiowy manipulator zamontowany na zdalnie sterowanym czterokołowym pojeździe terenowym GRYPHON [6] czy robot zasilany przez energię słoneczną [7].

Jednak takie konstrukcje są niezwykle drogie w produkcji oraz obsłudze. Dostęp do nich mają tylko jednostki wojska krajów wysoko rozwiniętych. Problem niewybuchów/min dotyczy niestety całego globu (często w krajach dopiero podnoszących się z zapaści, które nie stać na drogie urządzenia). Inżynierowie z takich krajów (np. Pakistanu) próbują rozwiązać ten problem, tworząc takie roboty jak MARWA [8].

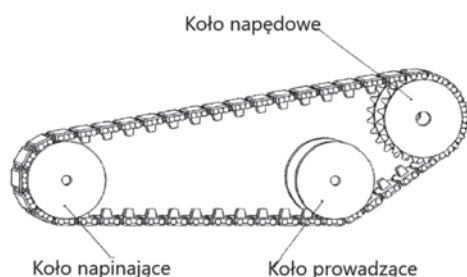
Właśnie te aspekty stanowiły motywację do stworzenia projektu taniego robota, który mógłby pomóc zidentyfikować i oczyścić niebezpieczne obszary. Takie rozwiązanie byłoby lepiej osiągalne dla biedniejszych krajów i mogłoby zapobiec niepotrzebnym szkodom.

2. CZĘŚĆ MECHANICZNA

Cele, które zostały postawione przed wyborem sposobu poruszania się robota, były następujące:

- możliwość poruszania się zarówno w terenie (trawa, piasek), jak i części zurbanizowanej (kostka brukowa, asfalt),
- łatwość w pokonywaniu nierówności terenu,
- jak najmniejszy nacisk na strukturę podłoża (aby zapobiec deformacji terenu).

Na ich podstawie po przeanalizowaniu klasycznych rozwiązań obecnych na rynku wybrany został układ gąsienicowy przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Elementy układu gąsienicowego [9]

Największą zaletą tego typu napędu (w stosunku do zawieszenia kołowego) to możliwość działania w trudnym terenie (błoto, śnieg). Powierzchnia styku gąsienicy jest o wiele większa niż w zawieszeniu kołowym, dzięki temu tylko na niezwykle sypkim gruncie istnieje możliwość wpadnięcia w poślizg [10].

Dodatkowo napężenie wywierane na podłoże jest bardzo niskie. Nowoczesny czołg M1A2 Abrams o masie bliskiej 72 ton wyposażony w taki układ ma podobny nacisk jak człowiek stojący na jednej nodze (82 kPa) [9].

Dodatkowo przeprowadzono dyskusję dotyczącą typu zawieszenia robota. Robot w założeniu musi operować na kamienistym terenie, przez co mogą wystąpić niekorzystne wibracje. Z uwagi na charakter pracy robota (preferowana jest mała prędkość ruchu w celu zwiększenia dokładności poszukiwań) zastosowane zostanie rozwiązanie z kołami sztywnymi.

Według Sandina [9] zjawisko wibracji przy małych prędkościach zanika, więc można bez problemu zastosować ten wariant w tym projekcie.

Kolejnym krokiem było sformułowanie modelu matematycznego. Niezbędne było dokonanie podziału na dwie części:

- kinematyka i dynamika układu gąsienicowego,
- mechanika pojazdu.

Każda z nich ma inny, ale równie istotny wpływ na poruszanie się całej platformy mobilnej.

Na początku rozważań model gąsienicy możemy traktować jako giętką, nierozciągliwą taśmę. Stanowi ona obwód wyznaczony przez nieodkształcalne podłoże, koło napędowe i napinające oraz koła nośne. Każdy punkt obwodu gąsienicy uczestniczy w dwóch ruchach:

- unoszenia względem drogi, po której porusza się pojazd,
- względnego w odniesieniu do pojazdu.

Pierwszym czynnikiem mającym wpływ na platformę jest poślizg. Zachodzi on w momencie, kiedy prędkość pojazdu różni się od prędkości względnej. Wielkość tę opisuje współczynnik poślizgu:

$$s = 1 - \frac{v}{v_R} \quad (1)$$

gdzie:

- v – prędkość pojazdu [m/s],
- v_R – prędkość punktu na obwodzie gąsienicy [m/s].

Na potrzeby kolejnych rozważań zmieniono model gąsienicy na oddzielne człony, które wpływają na jej ruch. Korzystając z rozważań przeprowadzonych w Burdzińskim [11], wprowadzone zostaje pojęcie prędkości średniej. Spowodowane jest to faktem, że prędkość kątowa koła napędowego jest zmienna. Wpływa na to fakt, że pojazd gąsienicowy to układ dynamiczny działający na niejednorodnym podłożu.

Dodatkowo wpływ ma skończona długość podziałki gaśienicy. Wzór na prędkość średnią jest następujący:

$$v_{sr} = t_g n_k z (1 - s) \quad (2)$$

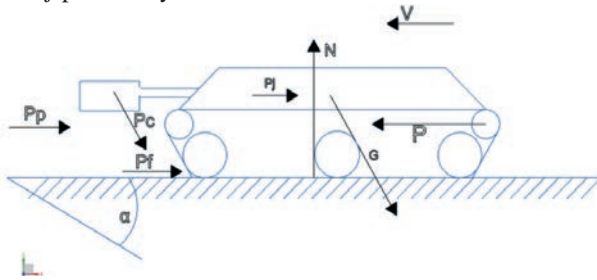
gdzie:

- t_g – podziałka gaśienicy [m],
- z – liczba zębów koła napędowego,
- n_k – liczba obrotów koła napędowego [rad/s].

Ostatnią rzeczą, którą trzeba uwzględnić jest sprawność gaśienicy. W trakcie względnego ruchu dwóch sąsiadujących ogniw występują straty z powodu tarcia. Zależą one od naciągu gaśienicy, sił odśrodkowych oraz momentu napędowego. Wzór jest bardzo skomplikowany stosuje się zamienny, uproszczony wzór [11]:

$$\eta_g = 0,95 - 0,005 v_{sr} \quad (3)$$

Kolejnym krokiem było stworzenie modelu ruchu całej platformy.



Rys. 2. Siły działające na pojazd

Na rysunku 2 zostały przedstawione siły działające na pojazd poruszający się po wzniesieniu o kącie w stosunku do pionu α . Są to:

- P – siła napędowa [N],
- N – siła reakcji podłoża [N],
- P_p – siła oporu powietrza [N],
- P_f – siła oporu toczenia [N],
- P_c – siła ciężkości cewki [N],
- G – siła ciężkości robota [N],
- P_j – siła bezwładności [N].

Omówione zostaną poniższe siły:

- 1) Siła ciężkości pojazdu – przyłożona jest w środku ciężkości. Obejmuje ona masy zarówno samego korpusu, jak i manipulatora z cewką.
- 2) Siła oporów toczenia – dla pojazdów gaśienicowych opis tej siły jest złożony, dlatego według Burdzińskiego [11] można opisać ją równaniem:

$$P_f = f (G + P_C) \cos \alpha \quad (4)$$

gdzie f – współczynnik oporów toczenia.

- 3) Siła reakcji podłoża – w robocie to wypadkowa siła oddziaływania gruntu na dolną taśmę gaśienicy.

Jej wartość można wyznaczyć z równania:

$$N = (G + P_C) \cos \alpha \quad (5)$$

- 4) Siły oporów powietrza – wynikają z geometrii pojazdu i mogą zostać wyrażone wzorem:

$$P_p = \rho c A v^2 \quad (6)$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],
- c – współczynnik oporu pojazdu,
- A – powierzchnia czołowa pojazdu [m^2].

- 5) Siła bezwładności pojazdu – występuje dla nieinercyjnego układu odniesienia i jest przyłożona w środku ciężkości pojazdu, a jej wzór to:

$$P_j = (G + P_C) \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

- 6) Siła napędowa – powstaje w wyniku działania układu napędowego. Dla ruchu nieustalonego wzór ten ma postać:

$$P = \frac{M_k}{r_k} \eta_g - \frac{M_j}{r_k} \quad (8)$$

gdzie:

- M_k – moment z koła napędowego [Nm],
- r_k – promień koła napędowego [m],
- M_j – moment styczny sił bezwładności wszystkich obracających się części gaśienicy w odniesieniu do osi koła napędowego [Nm].

Ostatecznie po uporządkowaniu i wprowadzeniu założeń można otrzymać dwie formuły:

- 1) Dla ruchu prostoliniowego jednostajnego można zaniedbać człony zawierające dv/dt . Dodatkowo dla założonych prędkości poruszania można zaniedbać wpływ oporu powietrza i równanie ma postać:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f (G + P_C) \cos \alpha + (G + P_C) \sin \alpha \quad (9)$$

- 2) Dla poruszania się po płaskim terenie kąt α równa się 0, więc:

$$\frac{M_k}{r_k} \eta_g = f (G + P_C) \cos \alpha \quad (10)$$

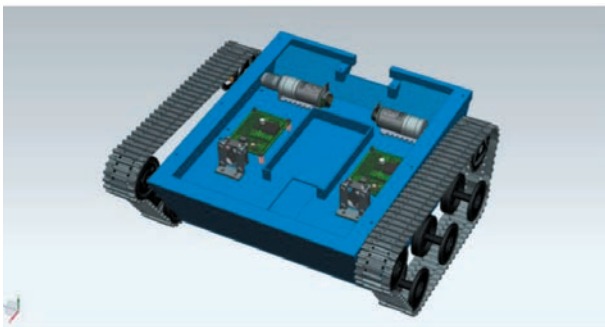
Po wyprowadzeniu równań wykonane zostaną obliczenia dla minimalnego momentu, który trzeba dostarczyć do układu napędowego. Założenia to poruszanie się z prędkością 0,4 m/s na wzniesieniu o kącie 10 stopni (dla normalnych dróg odpowiada to procentowemu wzniesieniu 17,63%). Dla porównania największe wzniesienia w Alpach mają 32% [11]).

Dodatkowo niezbędne jest jeszcze przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa. W literaturze dla pojazdów o stałym obciążeniu wynosi on 1,15 [11]. Jednak z racji tego, że jest to pionierska konstrukcja, przyjęto współczynnik bezpieczeństwa $n = 1,4$. Otrzymały ostatecznie moment wynosi:

$$M_k = 0,56 \text{ Nm} \quad (11)$$

Dla tego momentu dobrano:

- zestaw układu gaśnicowego,
- silniki marki Pololu,
- sterowniki przeznaczone do silników,
- wentylatory chłodzące.



Rys. 3. Model CAD platformy mobilnej

Aby zweryfikować, czy wszystkie elementy platformy poprawnie mieszczą się w korpusie robota, wykonany został model zawieszenia (rys. 3) wraz z komponentami, które zostały już dobrane. Korpus jest przygotowany do wykonania w technologii druku 3D.

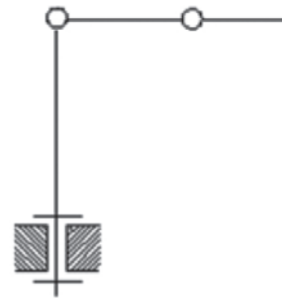
Kolejnym krokiem była konstrukcja manipulatora. Powinna ona spełniać następujące wymagania:

- możliwość prowadzenia pomiarów na ściśle określonej wysokości nad podłożem,
- wykonywanie operacji „przemiatania” (prowadzenie detekcji na większym obszarze dla jednej pozycji robota).

W projekcie zostanie użyty manipulator o trzech pierwszych stopniach swobody (rys. 4), gdyż są one wystarczające do spełnienia wyżej wymienionych założeń projektowych. Wynika to z faktu, że dotyczą przemieszczania cewki w przestrzeni, a nie pozycjonowania jej względem podłoża.

Po zakończeniu analizy najczęściej spotykanych struktur kinematycznych zostanie użyta struktura RRR (obrotowe antropomorficzne ramię manipulatora), gdyż cechuje się:

- uniwersalnym zastosowaniem,
- dużą przestrzenią roboczą,
- niezawodnością.



Rys. 4. Obrotowe antropomorficzne ramię manipulatora [12]

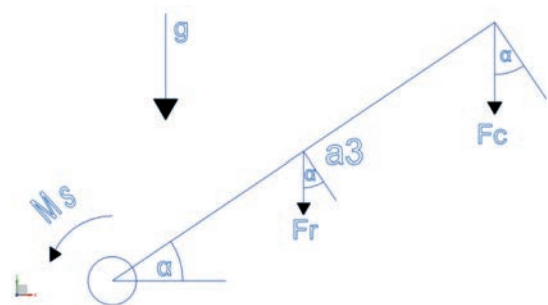
Ma ona też wady takie, jak np. duży koszt wysokiej powtarzalności manipulatora, jednak w przypadku operacji przeszukiwania gruntu jest to niepotrzebne i wygenerowałoby dodatkowe koszty.

W tej części, korzystając z notacji Denavita–Hartenberga, otrzymano macierz przekształcenia jednorodnego:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & c_1 & s_1 (a_2 c_2 + a_3 c_{23}) \\ s_{23} & c_{23} & 0 & a_2 s_2 + a_3 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Na jej podstawie oraz złożonych punktów, które ma osiągnąć manipulator, dobrano długości członów manipulatora. Wykorzystano do tego metodę opracowaną w pracy Siciliano, Sciacivco, Villani i Oriolo [13].

Kolejnym krokiem był dobór napędów. Dla każdego członu osobno formułowano model matematyczny i na jego podstawie obliczano moment potrzebny do poruszenia danym członem oraz serwomechanizm (rys. 5).



Rys. 5. Siły działające na trzeci człon

Celem ostatniej części było wykonanie modelu CAD poszczególnych członów oraz złożenia ich wraz z serwomechanizmami. Dla tak przygotowanego manipulatora wykonano analizę metodą elementów skończonych. Złożenie całego elementu pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Model CAD manipulatora

Materiał, z którego zostaną wykonane elementy składowe manipulatora, to tworzywo ABS. Zastosowanie tworzywa sztucznego, którego można użyć jako filamentu w drukarce 3D typu FDM ma szereg zalet:

- w wypadku użycia metalu jako materiału konstrukcyjnego układ pomiarowy mający wykrywać metal w otoczeniu zostaje zakłócony – jest to kluczowa cecha,
- tworzywo ABS używane w drukarkach odznacza się dużą wytrzymałością na obciążenia oraz odpornością na warunki atmosferyczne.

3. CZĘŚĆ ELEKTRONICZNA

Układem, który stosuje się głównie w czasie poszukiwań metalu w ziemi, to wykrywacz metalu. Układ ten działa, korzystając z prawa Faradaya oraz uogólnionego prawa Ampera.

Według Hallidaya, Walkera i Resnicka [14], prawo Faradaya sformułowane jest w następujący sposób: „Pole elektryczne jest indukowane zmiennym w czasie strumieniem pola magnetycznego”.

$$E = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

gdzie:

$\frac{d\Phi_B}{dt}$ – zmiana strumienia indukcji magnetycznej [Wb] w czasie,

E – siła elektromotoryczna [V].

Według Hallidaya, Walkera i Resnicka [14] uogólnione prawo Ampera sformułowane jest w następujący sposób: „Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienny w czasie strumień pola elektrycznego”.

$$\int \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I \quad (14)$$

gdzie:

$\int \vec{B} d\vec{l}$ – całka indukcji magnetycznej do zamkniętej krzywej [T],

μ_0 – przenikalność elektryczna próżni [H/m],

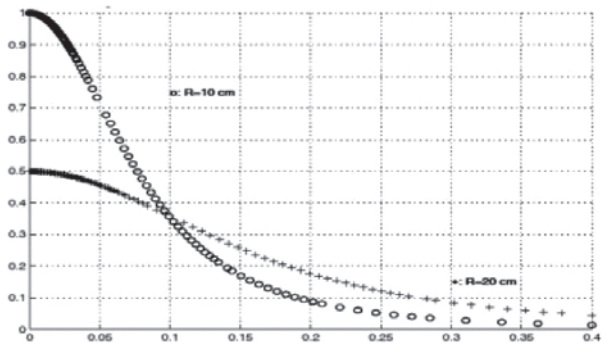
ϵ_0 – przenikalność magnetyczna próżni [F/m],

$\frac{d\Phi_E}{dt}$ – zmiana strumienia indukcji elektrycznej w czasie [Vm],

I – natężenie prądu [A].

Wykrywacz za pomocą układu elektrycznego wytwarza pole magnetyczne. Swoje zadanie sensor zaczyna spełniać, gdy znajdzie się w obszarze, gdzie fale elektromagnetyczne zaczynają oddziaływać na materiał przewodzący znajdujący się np. w ziemi. W obiekcie wtedy indukuje się siła elektromotoryczna (prawo Faradaya). Zaczynają się tworzyć tzw. prądy wirowe, które są powodem powstania wyindukowanego pola magnetycznego (uogólnione prawo Ampera). Nowe pole magnetyczne zaczyna oddziaływać na cewkę. Zaczyna płynąć prąd, który jest rejestrowany przez układ pomiarowy wykrywacza.

Właściwości drugiego pola są zależne od wielu parametrów, m.in.: geometrii samego przedmiotu (odległość od wykrywacza, orientacja względem niego), właściwości materiałowych (kształt, wielkość, przewodność, przenikalność magnetycznej). Wielkość i kształt samej cewki też mają bardzo duże znaczenie, co jest pokazane na wykresie z rysunku 7.



Rys. 7. Zależność pola magnetycznego od odległości od dwóch różnych cewek [15]

Znormalizowany wykres przedstawiający zależność pola magnetycznego od odległości d [m] od cewek dla dwóch różnych ich rozmiarów (10 cm oraz 20 cm) przedstawiono na rysunku 7. Normalizacja przeprowadzona została dla cewki mniejszej na odległości $d = 0$ [15].

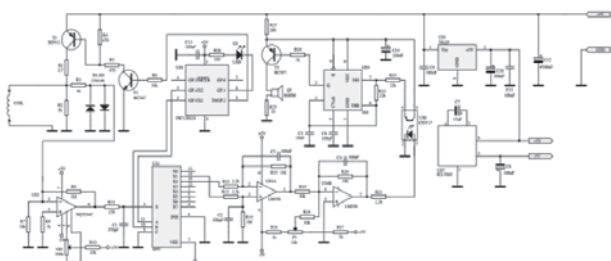
Na rynku znajduje się szereg rodzajów wykrywaczy. Po przeanalizowaniu typów wykrywaczy wybrano typ PI (*Pulse Induction*).

Detektory te działają na zasadzie regularnego generowania impulsów elektrycznych wysyłanych do sondy. W momencie zaniku impulsu elektrycznego

następuje utrata pola magnetycznego na sondzie. Czas, z jakim to się dzieje, zależy od tego, czy znajduje się w nim metal. Jeżeli takowy jest, to pole zanika dużo wolniej, co można wykryć. Jego zalety to:

- brak wrażliwości na mineralizację gleby,
- prosta konstrukcja (wystarczy jedna sonda).

Samodzielne wykonanie wykrywacza jest trudne. Liczba zmiennych wpływających na działanie jest duża, dlatego koszt gotowych wykrywaczy zaczyna się od 300 zł (65 euro). Dodatkowo jednym z założeń było przeprowadzenie pomiarów i wykonanie różnych cewek. Z ich pomocą znaleziono optymalne wartości takich parametrów jak średnica oraz ilość zwojów. Wykorzystano zestaw do samodzielnego montażu firmy Jabel. Układ ten nazywa się J-297 (rys. 8).



Rys. 8. Płytki wykrywacza Jabel J-297

Jak wspomniano wcześniej, sprawność wykrywacza jest zależna od parametrów cewki. Z tego powodu zaplanowano wykonanie pomiarów. Celem pomiarów było zoptymalizowanie wymiarów cewki (które zależą od dwóch parametrów):

- liczba zwojów cewki,
- średnica cewki.

Celem było zachowanie jak najmniejszej wagi przy uzyskaniu jak najlepszych wyników w wykrywaniu metalowych elementów.

Z powodu wybranych docelowych wymiarów robota wybrano dwie średnice cewek użytych do optymalizacji: 10 cm oraz 12 cm. Wykonano dla nich odpowiednie „pady” (wydruk 3D składający się z podstawy oraz szeregu pionowych kolumn służący do ułatwienia procesu nawijania cewki), na które nawinięto cewki o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1
Sporządzone cewki

Numer cewki	Średnica cewki [cm]	Liczba zwojów	Waga [g]
1	10	50	46,9
2	10	70	65,6
3	10	95	89,0
4	12	40	45,0
5	12	60	67,5

Wybrano dwa obiekty pomiarowe:

- moneta 1 lev bułgarski (średnica 24,5 mm, grubość 1,9 mm),
- puszka metalowa 0,33 l znanego producenta napoju cola (wysokość 116 mm, szerokość 66 mm, głębokość 66 mm).

Na potrzeby pomiarów wykonano stanowisko pomiarowe (rys. 9). Przedmiot znajduje się na wydrukowanej platformie poruszanej w górę i dół za pomocą sznurka, który za pomocą bloczka tworzy maszynę prostą. W momencie, gdy wykrywacz wykryje monetę, można utwierdzić sznurek, przeplatając go kilkukrotnie przez element drukowany znajdujący się na dolnej półce stołu. Umożliwia to wyeliminowanie błędu spowodowanego drżeniem ręki.



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe dla monety

Skrótowny plan wykonywania pomiarów:

- 1) włączenie wykrywacza,
- 2) kalibracja wykrywacza,
- 3) wykonanie pięciu pomiarów,
- 4) wyłączenie wykrywacza.

Dla każdego obiektu ta procedura została powtórzona trzy razy. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2, a opis symboli to:

- wartość średnia: μ [cm],
- odchylenie standardowe: σ [cm].

Korzystając ze wszystkich zrobionych pomiarów, wybrano ostatecznie cewkę o średnicy 12 cm mającą 60 zwojów.

Ważną kwestią jest także sposób komunikacji operatora z robotem. Przyjęto następujące założenia projektowe:

- prostota obsługi,
- brak autonomiczności robota (użytkownik kontroluje ruch robota).

Tabela 2
Zestawienie wyników pomiarów

Cewka	μ puszki [cm]	σ puszki [cm]	μ monety [cm]	σ monety [cm]
1	25,91	2,29	11,33	0,15
2	25,69	0,93	12,14	0,3
3	26,52	2,9	13,66	0,5854
4	26,13	1,64	14,12	0,42
5	29,73	1,19	60,0	0,27



Rys. 10. Przykładowy histogram z pomiarów

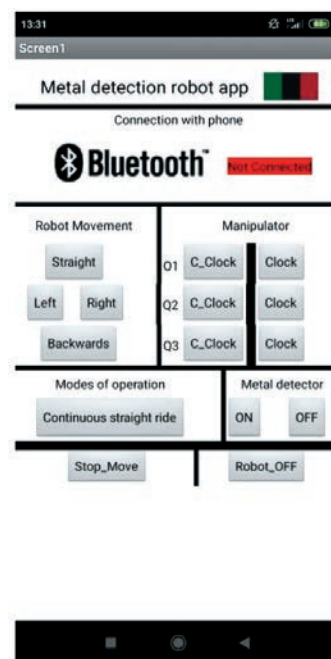
Z uwagi na powyższe założenia został wybrany standard bluetooth. BLE (*Bluetooth Low Energy*) zapewnia bardzo niskie zużycie energii i zasięg nawet do 20 m.

Dodatkowo istnieje możliwość wykonania specjalnej aplikacji na telefon z systemem Android, którą można na bieżąco rozwijać.

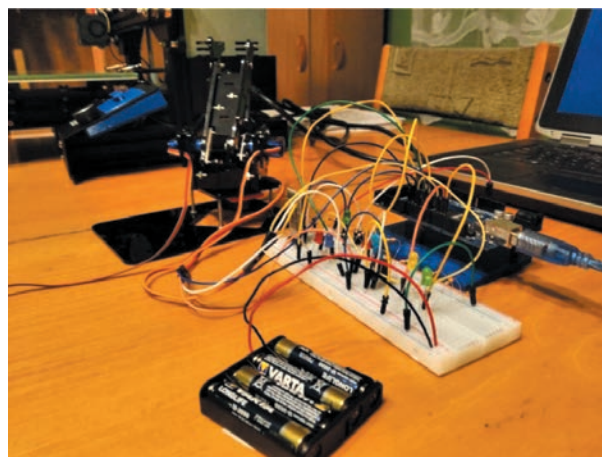
Aplikacja napisana została na stronie appinventor.mit.edu. Strona ta pozwala na pisanie aplikacji na Androida bez konieczności stosowania konwencjonalnych języków programowania. W tym środowisku wykonuje się aplikacje, stosując bloki odpowiadające konkretnym akcjom (np. wysłaniu sygnału jednobitowego za pomocą bluetooth).

Po stworzeniu wszystkich niezbędnych funkcji aplikacja została skompilowana i zapisana jako plik o rozszerzeniu .app. Plik ten jest obsługiwany przez większość popularnych obecnie marek telefonów. Wygląd aplikacji po zainstalowaniu w telefonie przedstawiono na rysunku 11.

Kod stworzony do działania mikrokontrolera napisany w środowisku Arduino IDE. Skorzystano z biblioteki Servo. Sama konstrukcja programu oparta jest na komendach *switch...case* w celu zapewnienia czytelności i przejrzystości kodu. Na potrzeby testowania działania kodu wykonane zostało stanowisko badawcze za pomocą płytki prototypowej oraz manipulatora (rys. 12).



Rys. 11. Zrzut ekranu aplikacji z prywatnego telefonu



Rys. 12. Stanowisko testowe aplikacji mobilnej

Sygnalizowanie poszczególnych funkcji dla platformy mobilnej oraz wykrywacza zostało zrealizowane za pomocą diod LED. Pozwala to w tani i prosty sposób przetestować działanie komunikacji tych funkcji.

Na samym końcu dokonano doboru płytki sterującej. Do sterowania całym układem użyty zostanie mikrokontroler Arduino Mega (rys. 13).

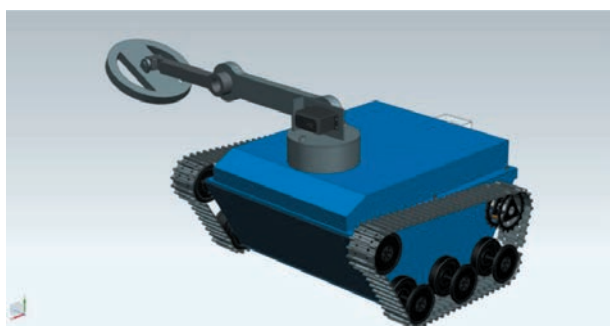


Rys. 13. Arduino Mega

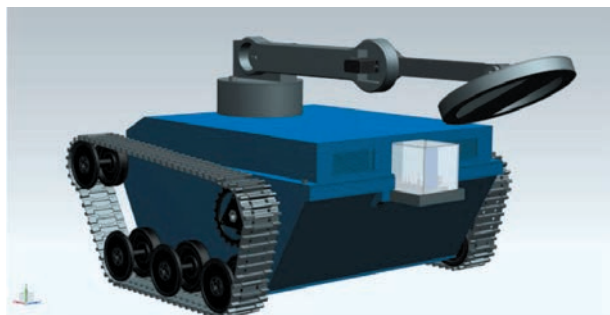
Jest to układ powszechnie dostępny na rynku, oferujący przystępną cenę oraz dużą liczbę portów do podłączenia elementów peryferyjnych.

4. ZŁOŻENIE ROBOTA

Po wyselekcjonowaniu wszystkich ważnych komponentów elektrycznych ostatnim krokiem było dobranie zasilania oraz przetwornic, które zapewniłyby ciągłe dostarczanie odpowiedniego napięcia na silniki i serwo mechanizmy. Wybrano ogniwo Li-Pol, gdyż jest ono powszechnie stosowane w robotyce. Przetwornic natomiast wybrane zostały one z katalogu firmy Pololu.



Rys. 14. Model CAD robota – widok na przód z boku



Rys. 15. Model CAD robota – widok na tył z boku

Po dobraniu wszystkich elementów cały robot został złożony, co i zostało przedstawione na powyższych renderach (rys. 14 i 15). Cały robot waży około 3,5 kg.

5. PODSUMOWANIE

Cel, jaki został postawiony przed rozpoczęciem realizacji pracy, czyli projekt robota, został zrealizowany. Dzięki tak obszeremu zakresowi prac możliwe było zastosowanie wiedzy nabytej na studiach I stopnia. Szczegółowe zagadnienia dotyczyły mechaniki,

doboru napędów, kinematyki manipulatorów, badań wykrywacza metali oraz programowania.

Jednocześnie jest to projekt. Pełna jego weryfikacja możliwa jest dopiero w momencie budowy samego robota. Eksploatacja i testy prototypu mogą wygenerować sytuację, których nie da się przewidzieć na etapie tworzenia założeń oraz projektowania. Nie oznacza to jednak, że faza projektowania może być zaniedbana. Podczas niej można uniknąć kosztownych pomyłek, które zostałyby odkryte dopiero na dalszych etapach projektu i skutkowałyby koniecznością zmian konstrukcji, a także pociągałyby za sobą dodatkowe koszty.

Dodatkowo po zapoznaniu się z rozwiązaniami obecnymi na rynku warto zastanowić się, czy dobrze byłoby wzbogacić projekt robota o dodatkowe funkcje. W większości projektów na końcu manipulatora znajduje się chwytak, który pozwala pozycjonować układ sensoryczny względem krzywizny gruntu.

Kolejną ważną rzeczą byłoby przeprowadzenie testów wykrywacza dla obiektów znajdujących się w glebie. Układ Jabel spełnił swoje założenia dla testów w powietrzu, jednak jego osiągi znacząco mogą się pogorszyć, gdy poszukiwania będą prowadzone w ziemi, więc warto sprawdzić jego działanie w tym obszarze. Dodatkowo w części elektronicznej można rozważyć dodanie kamer/czujników ultradźwiękowych co zwiększy autonomiczność robota.

W części związanej z software'em testy prowadzone na płytce prototypowej pozwoliły ustabilizować komunikację z modułem bluetooth, jednak niemożliwe było odwzorowanie w 100% działania robota. Jedną z ważniejszych rzeczy to enkoder, który jest umieszczony w silnikach odpowiedzialnych za sterowanie platformą mobilną. Jest on niezwykle cennym elementem, gdyż pozwala na precyzyjne sterowanie robotem oraz poprawę płynności działania samego układu (można zastosować regulator). Na płytce prototypowej nie było możliwe przetestowanie tego, więc do czasu ewentualnych testów na prototypie robota niezbędne jest uwzględnienie enkoderów w algorytmie sterowania robotem.

6. WNIOSKI

Zamierzony cel w postaci projektu robota eksploracyjnego został osiągnięty. W ramach przyszłych prac potrzebny jest jego dalszy rozwój i praktyczna realizacja, aby otrzymać w pełni działającego robota.

Literatura

- [1] Hempala U.M.: *Robots for Humanitarian Demining*. InTech, 2017.
- [2] Chmieliński M.: *Bezpieczeństwo neutralizacji niewypałów i niewybuchów amunicji artyleryjskiej w strefie przybrzeżnej*. Autobusy, 2017, 6: 99–106.
- [3] Munkeby S., Jones D., Bugg G., Smith K.: *Applications for the MATLIDA Robotic Platform*. Proceedings SPIE 2002, 4715, 206–2013.
- [4] Jankiewicz M.: *Przeciwninowe roboty – pojazdy kroczące*. Biuletyn WAT 2017, 56: 273–286.
- [5] Gonzalez de Santos P., Garcia E., Estemera J., Armada M.A.: *DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location*. International Journal of Systems Science 2005: 545–558.
- [6] Fukushima F. E., Freese M., Matsuzawa T., Aibara T., Hirose S.: *Humanitarian demining robot Gryphon current status and an objective evaluation*. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems 2017: 735–753.
- [7] Albert F.Y.C., Mason C.H.S., Kiing C. K. J., Ee K.S., Chan K.W.: *Remotely operated solar-powered mobile metal detector robot*. Procedia Computer Science 2014, 42: 232–239.
- [8] Abubakr M., Syed M.A., Talha M., Adnan M., Syed A.A., Mhequb H., Ali A., Mian A.M.: *Marwa: A Rough Terrain Landmine Detection Robot For Low Budget*. Proceedings of the 43rd International Symposium on Robotics, London 2012.
- [9] Sandin P.: *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. McGraw Hill, New York 2003.
- [10] Rybak P.: *Tracked or wheeled chassis*. Journal of KONES Powertrain and Transport 2007, 3: 527–536.
- [11] Burdziński Z.: *Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
- [12] Buratowski T.: *Teoria robotyki*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2012.
- [13] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo.: *Robotics Modeling, Planning and Control*. Springer, London 2010.
- [14] Halliday D., Walker J., Resnick R.: *Podstawy fizyki. Tom 3*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [15] Bruschini C.: *A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining*. Rozprawa doktorska, Vrije Universiteit Brussel, Brussels 2002.

inż. ANDRZEJ FRĄCZEK
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
anfracze@student.agh.edu.pl

PAWEŁ KARELUS
KRYSTIAN SZOPA

Design and construction of a three-axis Pick and Place manipulator

The article presents the design and implementation of a three-axis Pick and Place manipulator based on OpenPnP software. It is designed for the placement of SMD components on PCB boards. A ready-made frame was used for the project, which required the selection of appropriate motors and the design of the required components for the Z-axis, which were design in Solidworks software. A belt drive was used to construct the manipulator as well as pneumatic components for lifting the SMD parts. Appropriate cameras were also selected and configured along with lighting, allowing the software to automatically check the progress of the machine. The next step was to select the electronic components of the machine and configure them before OpenPnp software was configured and prepared for the automatic placement of SMD components.

Key words: *manipulator, pick and place, SMD, OpenPnP*

1. INTRODUCTION

Pick and Place manipulators [1], as the name suggests, should perform the activities of picking up and moving components from one place to another. There are many solutions for such designs, and the two main solutions are the robotic hand (Fig. 1) and the two- or three-axis assembly manipulator (Fig. 2), which is described in this paper.



Fig. 1. Robotic hand style manipulator designed by AGH Space Systems

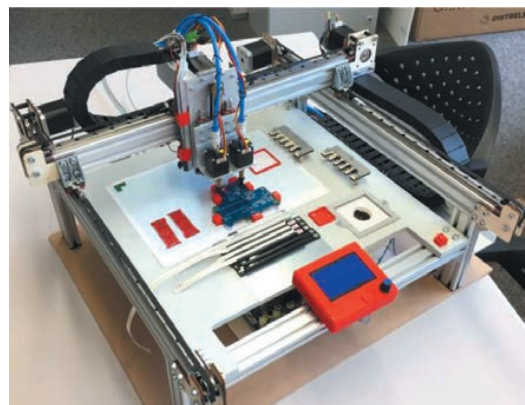


Fig. 2. A simple three-axis assembly manipulator

Its task will be to pick up and place SMD elements (surface-mount device. This abbreviation stands for all electronic components which are placed on the surface of PCB boards, i.e. resistors, capacitors or processors) on printed circuit boards. In plants engaged in mass production of complex electronic components, such manipulators do a large part of the work. However, they are industrial, which means that they have a relatively large size, as well as being very expensive to purchase and maintain.

Small factories with a small number of projects can outsource the assembly of the board, but this is also an expensive solution, and laying out the elements by hand often takes many hours and is tiring work due to its high repetition and small size of the elements. In order to reduce the time needed for the assembly of elements, it is possible to use a Pick and Place manipulator, which can be purchased or made by yourself. This frees up the worker to perform more complex tasks, while the machine performs simple, repetitive and long-lasting work.

There are many commercial manufacturers of Pick and Place manipulators. There are designs available in various sizes and throughputs, from smaller designs having single heads, to larger industrial designs having dozens of heads [3–4]. One example of such a machine available on the market is the LitePlacer manipulator (Fig. 3) manufactured by a company of the same name from Finland.

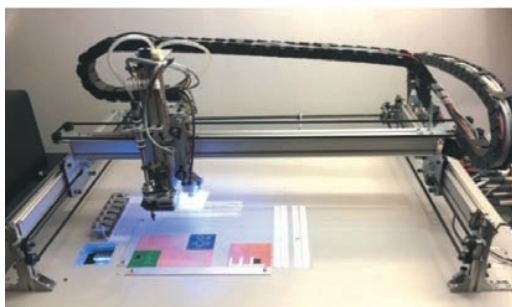


Fig. 3. LitePlacer manipulator [3]

Industrial designs that have very high speed and can stack tens of thousands of components per hour and have hundreds of inputs for various SMD components, which is needed if the board designs are complex are also available. However, they are used for mass production and are only applicable in large plants. One of the available solutions is the JUKI RS-1R machine (Fig. 4), manufactured by the Chinese company ETA. Such a manipulator is used as part of a production line, it has automatic inputs and outputs in the form of belt conveyors, thanks to which it is possible to connect several machines performing successive points in the production process. It has a throughput capacity of about 47,000 parts per hour, an impressive number.

However, if the costs associated with the purchase of a manipulator are too great, it is possible to design one's own device using the available open source software. On the other hand, this is a time-consuming

solution and requires knowledge of mechanics and mechanical engineering, as well as electronics and programming basics.



Fig. 4. JUKI-RS-1 manipulator [4]

2. HISTORY AND CHARACTERISTICS OF PNP MANIPULATORS

The history of Pick and Place manipulators dates back to the 1930s, but it was not until the post-World War II era that the first industrial units were created. With the development of technology and economics, the demand for the number of products produced by factories increased significantly, this increased the interest in machines that will perform simple and repetitive tasks instead of humans, especially in environments that threaten the health or life of workers [5].

The algorithm of assembly manipulators is not complicated at first glance. It is enough to perform only a few basic steps, which need to be repeated many times. In practice, calibration of each step takes time because of the required precision and repeatability.

The Pick and Place manipulator control algorithm requires several steps (Fig. 5). It starts with a CAD design of the PCB including the components to be laid out in it. This design is then loaded by the software installed on the computer that serves as the main controller of the device. This software matches the individual elements on the board to the elements on the feeders and creates instructions in a language understood by the electronic controller, most often G-code. The controller receives the instructions and executes them by sending electrical pulses to the appropriate connectors, which causes the machine to move in the proper directions to achieve the intended effect. To detect the correct positioning of the picked components, cameras are most often used, from which the image is processed by the software, which will be described later in this article.

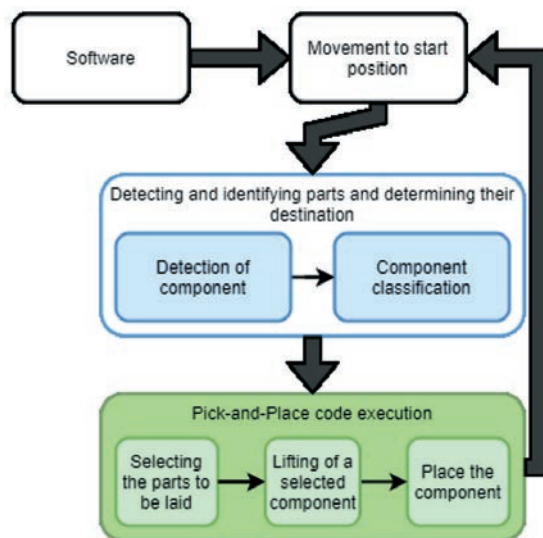


Fig. 5. Schematic of the PnP manipulator [6]

3. DESCRIPTION OF THE COMPLETED STRUCTURE

3.1. Project preparation

The beginning of any project is made up of assumptions and objectives. In this case, a previously prepared frame will be used (Fig. 6). This reduced the cost needed to construct the manipulator as well as the time. This design already had the X and Y axes ready with the screw drive applied. The work steps adopted were as follows:

- selecting and installing the motors that drive the axes,
- selection of the ratio of belt transmissions used to drive the X and Y axes,
- design and construction of Z-axis with mounts for two heads,
- design holders for sensors,
- mounting cameras,
- wiring of the machine,
- mounting the manipulator to a table with wheels,
- assembly of trays with SMD components,
- installation of power supply unit, controllers, keypad controller and emergency stop switch,
- connection and configuration of the controller using software designed for 3D printers,
- OpenPnP software configuration.

At the beginning, the mechanical structure of the manipulator will be made, then the electronic components will be connected and the final stage will be the installation and configuration of the software. The use of two heads is motivated by the fact that with

the planned use of a drive based on belt transmission. The control of them runs in a simple way. Mounting them on two sides of one pulley means that when one head is moved in one direction, the other one moves in the opposite direction. The use of two heads also means that the manipulator works faster than if only one head were used. Figure 6 gives an overview of the frame structure.

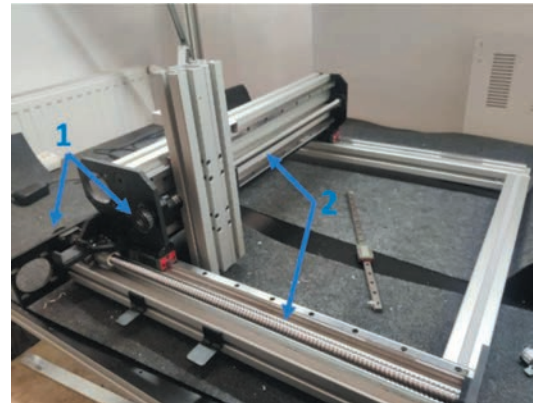


Fig. 6. Initial appearance of the frame:
1 – screw drives; 2 – pulleys

3.2. Mechanical design

Due to the fact that an off-the-shelf frame was used to construct the manipulator, some components were chosen in advance. These elements include the screw drive in the X and Y axes direction, or torque transmission from the motor, which is done through a belt transmission (both elements can be seen in Figure 6). As these drives will not transmit large torques and the highest possible speed is required, a gear ratio of 1 was selected. Nema 24-60HS88 series stepper motors with a nominal torque of 3 Nm were selected. The pulleys were selected, taking into account those already mounted on the propellers, to obtain the assumed ratio. The only possible way turned out to be the selection of an identical version of the wheels, namely HTD 22-5M-09 pulleys having 22 teeth and a pitch diameter of 35 mm. The axles are mounted to linear guides on specially designed carriages in order to achieve the lowest possible resistance to motion and stability of the structure.

3.3. Z-axis design

The Z-axis design (Fig. 7) was made in Solidworks according to the assumptions presented earlier. This

required a motor to be mounted on the axis along with a belt transmission to drive the heads, which were mounted in specially printed holders on linear guides and connected directly to the belt transmission. This caused the heads to move alternately. There is also a pneumatic system on the axle, causing a vacuum in the head, enabling the lifting of SMD elements.

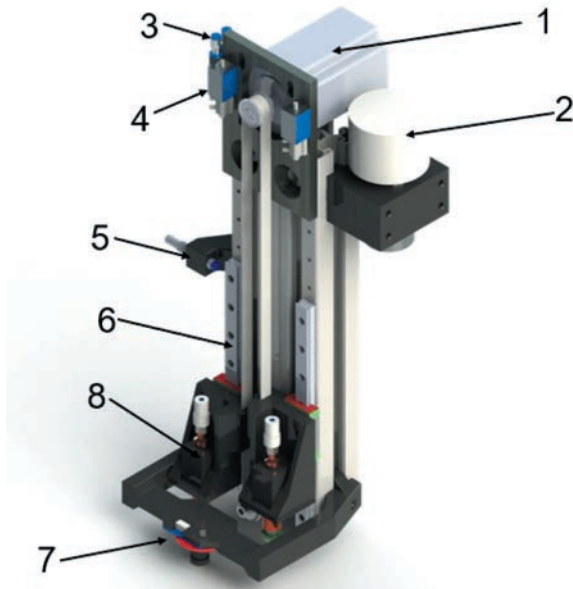


Fig. 7. Design of drive system in Z-axis direction made in Solidworks: 1 – stepper motor; 2 – pump; 3 – pneumatic distributor; 4 – solenoid valve; 5 – inductive limit sensor; 6 – linear guide; 7 – top camera; 8 – head

This system consists of the following elements: a vacuum pump, a distributor, two pneumatic solenoid valves with one input and two outputs and pneumatic hoses. The purpose of the pump is to create vacuum in the hoses enabling lifting SMD elements. The head is made of a hollow shaft, allowing simultaneously for rotation of the tip with the element lifted by means of previously mentioned vacuum. For proper functioning of the software there is a need for a camera, which will be in a fixed XY position in relation to the heads, it allows to detect elements on the tapes as well as the position of the PCBs.

Both the motor and the pneumatic system were mounted on top of the aluminium profile. The motor was mounted in such a way that it is possible to fix a gear on its pinion, and the motor mount itself allows belt tension. Solenoid valves were used because one pump was attached, if the elements are to be placed one after the other, turning off the pump would result in the loss of vacuum generated in both heads, which

would cause both elements to drop. By switching the valve instead of turning off the pump, the pressure can be equalized in one head only. The manifold allows two valves to be connected to one inflator. Pneumatic lines were not routed in the CAD model due to the fact that they are connected loosely, so it is difficult to predict their routing.

The inductive limit sensor (position 5, Fig. 7) is fixed so that its position can be adjusted at any time. The fastening to the aluminium profile is carried out by means of a screw with lock nut, which, together with a specially mounted bracket, results in a rigid position when the fastening screw is tightened. The sensor itself has a thread on almost its entire length, which also gives the possibility of adjusting the appropriate position.

The heads (item 8 on Fig. 7), responsible for the operation of lifting and putting down the elements, are mounted in specially designed holders and screwed to the carriages on linear guides. Owing to such a construction, their movement is smooth and without any problems connected to friction. The movement itself takes place because of the connection of the holder to the toothed belt by a specially designed fastening. This combination of elements limits the movement of the gear to a small range, but the required head movement is short.

The upper camera (position 7, Fig. 7) should be at a fixed distance from the heads, so it too was fixed using a suitably designed bracket.

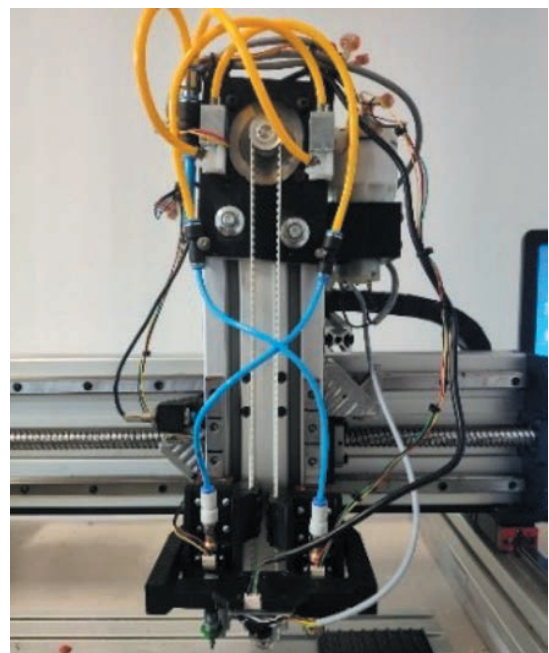


Fig. 8. Final appearance of the drive system in the Z-axis direction including the lifting system

connected via a USB port to the computer that operates the machine, so that the OpenPnP software has access to the image and can appropriately select the parameters of distance or rotation by which to move the head. The second element are LED lights mounted next to the cameras. They are used to illuminate plates and tapes with SMD elements in the case of the top camera and elements sucked to the head in the case of the bottom camera. They are connected to Arduino Nano controller, which is then connected to appropriate pins on the main controller. Controlling the lights will be described later.

4. ELECTRONIC COMPONENTS AND THEIR SOFTWARE

For the construction of simple PnP manipulators, the most common components used are those created to support 3D printers, they are readily available, not expensive and relatively easy to configure to support the manipulator. One of the most important practical requirements is that the controller software is able to support the original two extruders in the printer. However, if this is not the case, then the configuration code can be changed to support the manipulator but this is certainly problematic. Taking this into consideration, the MEGA 2560 microcontroller was used along with the RAMPS 1.4 overlay. This overlay is an extension of the MEGA 2560 microcontroller, it allows the connection of stepper motors along with stepper motor drivers. A simple and inexpensive A4988 stepper motor driver was chosen, two of which are ultimately needed, one driver supports only one motor, however they are not capable of controlling X, Y and Z axis motors. Their job is to operate the axis of rotation. One of these controllers is fitted with a view to future expansion of the machine. A HY-DIV268N-5A two-phase controller was chosen to control the motors of the main three axes. It has the ability to simply change the current as well as the number of micro steps. This configuration allows selected stepper motors to be controlled without any problems. The RAMPS also gives the possibility to connect limit sensors, which were also used in this project. Using the remaining pins, you can control additional elements, in the case of the manipulator these are solenoid valves, a pump or LED lights, for which you still need an Arduino Nano, because the signal coming out of the microcontroller is a PWM

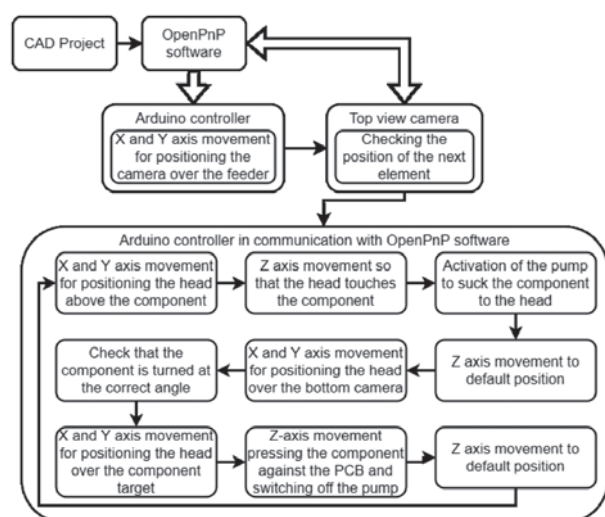


Fig. 9. Algorithm for manipulator control

However, not all elements are connected directly to the controller. The top and bottom cameras are

signal (Pulse-Width Modulation [7]). The microcontroller sends values starting from 0 all the way up to 255, so it is a digital signal that is not able to power the lights. So the signal is sent to the Arduino Nano microcontroller, which when it receives a value of 0 turns on the lights and when it receives a higher value turns them off. In practice, these three elements, not including Arduino Nano, form a whole. There is no need to configure each element separately, 3D printer driver software is uploaded to main microcontroller i.e. Mega 2560, which controls the rest without the need for external configuration. By adding an additional microcontroller to this configuration, we get the possibility of extending the manipulator with additional elements, in the case of this machine, these are LED lights, but in the future, you can extend the design by connecting to it also, for example, automatic feeders of SMD elements.

4.1. Configuration of the MEGA microcontroller

The most important changes to the default microcontroller configuration were:

- selection of the communication baud rate between the controller and the computer,
- setting of minimum and maximum position value of individual axes,
- setting of limit sensors (normally open, X and Y axis minimum sensor, Z axis maximum sensor),
- setting the resolution of stepper motors and their maximum speed and acceleration.

Due to the fact that the software used is intended for 3D printers, only three axes were provided in it. To be able to use the fourth axis, which acts as a rotation of the head, it was connected to the extruder connector, which required disabling support for temperature sensors used in printers.

After setting all the options, the finished program was installed on the controller. The next step was to configure Arduino Nano microcontroller.

4.2. Configuration of Arduino Nano microcontroller

LED boards are attached to the camera mounts. Their function is to illuminate the manipulator when the software downloads the image. Since they are

mounted parallel to each other but in opposite directions, they should not be lit up at all times when the machine is running. Light, illuminating the image from the lower camera, may result in interference with the image from the upper camera and vice versa. For this reason, the configuration of the microcontroller is not enough to get the lights working properly, but it is the first step. There are cables connected to pins 7 and 8 of the device that carry the enable signal. By using the appropriate code, the lights can be controlled to turn on and off by applying low and high voltage. The LED boards are connected in series, with 16 diodes on each one. The use of simple conditional instructions allows you to turn on the entire board virtually simultaneously, if the voltage at the output changes to low. The colour is given in RGB format, the value 250, 0, 0 is given, which means that the lights glow red. This shade was chosen because no part of the manipulator's structure is in the same colour and it causes noticeably less light reflection than when using white light.

5. OPENPNP SOFTWARE CONFIGURATION

Ensuring the proper operation of the manipulator also requires correctly configured software to control it. Firstly it was checked that all axes and sensors were working correctly. The OpenPnP software requires the machine coordinate system shown in Figure 10. Once satisfied that the components of the design were working correctly, moved on to determine the steps per mm for the stepper motors.

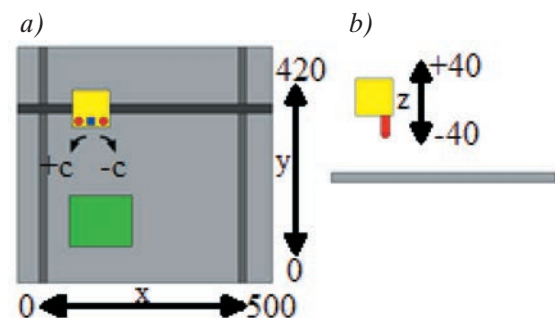


Fig. 10. Coordinate system of the manipulator:
a) top view; b) side view [8]

The resolution of stepper motors can be very easily calculated by dividing the number 360 by the step angle of the motor [9], which is 1.8° . The quantity calculated in this way determines the number of steps needed for a complete rotation of the motor. How-

ever, to calculate the value of steps per mm, the formula for screw drives should be used:

$$k_r = \frac{l_k \cdot m_k}{P} \quad (1)$$

where:

- l_k – number of motor steps per full revolution,
- m_k – number of micro steps,
- P – pitch of the propeller thread.

The assumption is 16 micro steps. For the formula we also need to know the pitch of the propeller thread, which is 8 mm. Knowing all these values, we can substitute them into equation (1) obtaining:

$$k_r = \frac{200 \cdot 16}{8} = 400 \quad (2)$$

It follows that it takes 400 steps for the motor to move an axis by 1 mm. To be sure that the value has been calculated correctly, it must be checked in practice.

To calibrate the basic settings of the OpenPnP software, the manual [10] created by the developers and available on Github was used.

5.1. Initial software settings

The first step is to install the OpenPnP software. Start by selecting a software driver so it can properly communicate with the microcontroller. For all designs where the control is based on the G-code language, there is a “GcodeDriver” option. Next, you need to select the port to which it is connected, and a baud rate of 115,200 Bd.

5.2. Calibration of the top camera

The first element to be calibrated is the top camera, which is mounted on the Z-axis. For cameras connected via USB ports it is recommended to use OpenPnP CaptureCamera driver and this is what was chosen. This option is the code that allows the software to correctly read the camera image and control it. The image format has also been set. The parameters of camera image processing such as brightness, saturation and white balance have been set so that the image looks the same at any time of day. This allows for correct operation of algorithms processing the image, e.g. to detect the SMD component on the tape, regardless of whether the manipulator is in a lit room or not.

The top camera, for best illustration, is called CameraTop One of the most important settings is the calibration of units (in this case millimetres) per image pixel. If this parameter is measured incorrectly, it can result in erroneous machine operation, because at some points in the operation algorithm the actual distance is measured from the image. The calculated values are 0.0662 mm per image pixel. The top camera is the zero point for the software. The next settings are the transformations of the images coming from the cameras. According to the recommendations, the image from the top camera should look like what a person looking at the manipulator from above sees, i.e. there should be elements in the top of the image that are further out in the Y-axis, etc. If the fixed camera does not provide such an image, it can be inverted vertically, horizontally or rotated by a given angle. It is also possible to crop the image, a useful operation as the camera lens resembles a hemisphere. As a result, the image does not have constant dimensions (the number of pixels per 1 mm around the centre of the image is not equal to the number of pixels per 1 mm at the edges of the image).

5.3. Calibration of the bottom camera

The configuration of the bottom camera is similar to the configuration of the top camera, however the set values differ because this element is set in a different place and is responsible for detecting the rotation of already lifted parts and the position of the head tip. The camera was named BottomCamera to maintain the naming theme. The mm value per image pixel equal to 0.017 mm was also calculated. The image transformation settings were also chosen so that the image is similar under all external lighting conditions. One of the most important settings for the bottom camera is to determine its position, but it must be a position where the tip of the head is perfectly in the centre of the vision. This cannot be calculated, therefore, without first calculating the distance at which the head is located from the upper camera, which is the zero point for the software.

5.4. Nozzle calibration

Initially, only one head was configured so that it would be easier to verify the correctness of the design. It was given the name N1. Then, to enable

automatic operation of the pneumatic components, appropriate switches were added, which send G-code commands to turn on or off the relevant components. Thus, a Vacuum switch was created, which causes the pump to turn on or off, and two switches N1_VAC and N2_VAC (denoting the solenoid valves for head one and head two). The next configuration step was to determine how far the head was from the manipulator zero point. Performing this step also allowed us to determine the location of the bottom camera. Determining the position of the camera also allowed us to determine the misalignment error of the machine, which, if too large, can affect the incorrect performance of the manipulator.

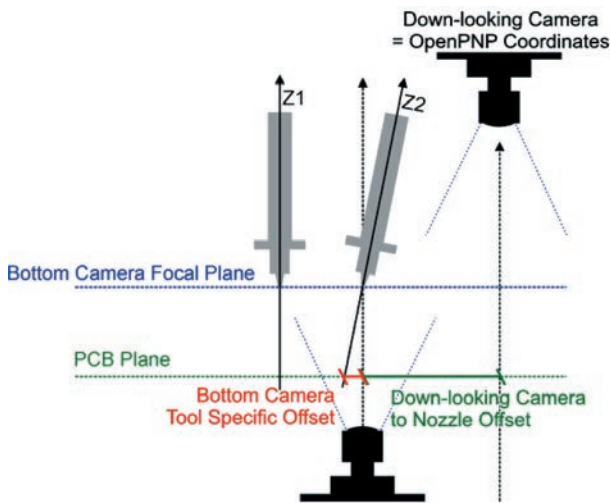


Fig. 11. Visualization of misalignment error [11]

As shown in Figure 11, if the head is not mounted in an axis perpendicular to the plane of the PCBs, this results in offset. Additionally, if the nozzle itself is not made with concentricity or the head tip is mounted in a way that causes misalignment, it is difficult to determine the point where the head tip touches the PCB, due to the fact that the offset changes direction and/or value with the rotation of the head motor. Thus, an algorithm that processes the camera image and detects the head tip is used for this process. Once the bottom position of the camera is determined, the head tip should be in the centre, then the algorithm performs a rotation of the head motor so that the sum of these rotations is 360° . This gives an idea of how the position of the head tip changes in terms of rotation at each location. After each individual rotation, a camera view is taken and processed by specially selected algorithms to detect where the head tip is located. It consists of several smaller stages, which ultimately should lead to the detection of a single circle

at the location. This, along with the previously calculated number of mm per pixel of the downstream camera, allows the algorithm to calculate how much misalignment error there is at a given motor rotation. This result is stored and then added or subtracted when performing automatic moves. However, it should also be taken into account that no limit sensor is fixed in the axis of rotation of the head. This causes the rotation position to be set to 0 each time the machine is turned on, so that added values may not work correctly and increase the error instead of eliminating it. It is therefore important that this calibration is done after every basing of the manipulator.

5.5. Basing the manipulator

When the machine is powered up, the axis position is automatically set to 0. So in order for the software to know the exact position of the machine, a basing operation must be performed. This consists of three steps:

1. access by axes to the end points according to the manually entered G-code,
2. drive the camera over a special point located on a table with a fixed position to ensure as much baseline repeatability as possible,
3. drive the head over the lower camera to calibrate the misalignment error (described in the previous section).

The first stage consists of several commands in G-code language. They ensure safe arrival of each axis to the limit sensors. When basing automatically, it should be remembered that there may be a situation when the head is in a low position.

SMD components often have small dimensions, so every option available to increase precision should be used. One of those options includes moving the camera over a specially prepared black point located on a table with a fixed position in relation to the structure. Its position was included in the configuration file, so after the first stage of basing and moving over this point one of the algorithms processing the image of the camera, checks if it is located perfectly under the camera. If there is a shift, the position of the machine is corrected. If the point is not detected, the basing operation is interrupted and it has to be performed again. The next step is to drive the head over the lower camera to calculate the misalignment. However, if the misalignment is not calculated correctly, the basing operation is also interrupted.

6. IMAGE PROCESSING ALGORITHMS

In order for the manipulator system to work automatically, suitable algorithms are required to detect the required elements in the camera image. One algorithm consists of several smaller algorithms that can be selected according to the requirements, ultimately leading to the detection of the component. Of course, they differ depending on what component needs to be detected. The selection of appropriate algorithms should be done after the configuration of the image coming from the cameras. It is important that the algorithms work similarly in all lighting conditions.

However, the general principle of the image algorithms is similar. Each of them starts by retrieving a frame from the camera image after the settling time has elapsed. Then it reduces the downloaded frame in order to minimize the number of elements in the image. Subsequently, image processing operations are performed and the final result is drawing on the initially downloaded frame of the detected element – a rectangle or a circle. Nonetheless, there are many of the algorithms used by the camera software due to the fact that it is used to detect raised SMD elements. The algorithms used by the downstream camera can be divided into two main directions, as those used to detect lifted parts look very similar, mostly differing only in the selection of single values in the stages of the teardown process.

The second algorithm is the one for head tip detection. It consists of eight steps presented and described below. They should be selected in such a way that only one circle is detected which is exactly at the head end. If, for example, the detected circle is smaller or larger than the end of the head but its centre coincides with the actual centre of the component, this does not cause problems because the software only takes into account the centre point. The tip of the head is one, so there should be no more circles drawn in the image. The steps of the algorithm are as follows [9]:

1. ImageCapture – when the camera fix time expires, one frame is taken from the bottom camera image.
2. MaskCircle – algorithm bounds the previously taken frame with a circle of 350 pixels in diameter, the rest of the image is covered with black colour.
3. Bgr2Gray – performs colour conversion from the BGR system (24 bit colour value storage) to the grayscale system.

4. Threshold – this algorithm converts the image into two colours – black and white.
5. BlurMedian – performs pixel averaging. This removes noise from the image.
6. DetectCirclesHough – this algorithm is used to detect circles with a diameter within a specified range on the image.
7. ImageRecall – this algorithm overwrites the processed image with the initially downloaded frame.
8. DrawCircles – this algorithm draws the Circles detected in step 6 on the frame referenced in the previous step.

The algorithms used by the main camera differ from those used by the lower camera because they are mainly used to detect reference holes on the component tape or PCBs. During the automatic operation, the manipulator moves the upper camera over the position where the next component to be lifted should be and checks where and if the tape reference holes are located. In this way very precise calibration of long tapes (at which possible error was more noticeable) is not required, because with each lift the software checks and performs a possible correction of the position.

In theory, the algorithm for reference hole detection may resemble that for head tip detection. However, due to different camera settings and different lighting conditions for these elements, these algorithms had to be chosen differently. The last way of detecting elements is the algorithm for finding reference holes on PCBs. It is used to automatically determine the position of the PCB in the working field. It saves work for the user because the elements have to be placed with a very high accuracy so manually fixing the position every time one begins work would be tedious.

7. DESCRIPTION OF MANIPULATOR OPERATIONS

Once the manipulator configuration is done, it can be proceeded to perform the first automatic operation of the machine. When the machine is turned on, start by configuring the misalignment error. The operation of the algorithm detecting the head tip is shown in Figure 12. As can be seen in it, the image is first bounded by a circle and then its coding is changed to grey shades. In the next stage, pixels that are above

the selected grey scale intensity are detected. The image is cleaned from noise and in stage 6 a circle is found. Stage 8 shows that the algorithm has worked correctly. These instructions are executed for 6 different head rotations to detect the error with the current head axis configuration.

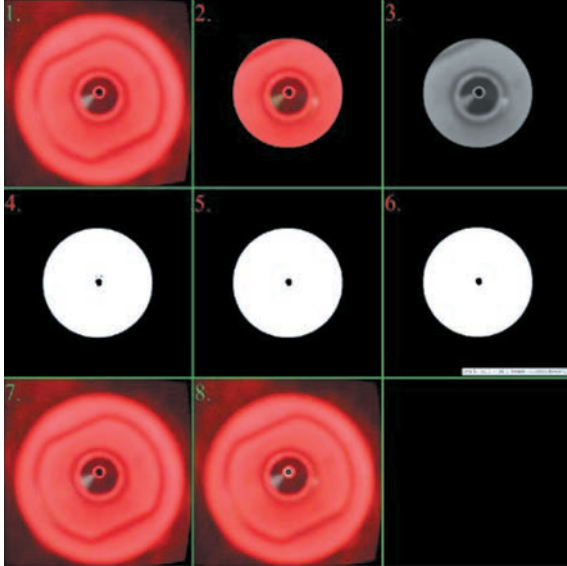


Fig. 12. Operation of the manipulator head tip detection algorithm. Numbering according to the algorithm presented in Section 6

The next step is to prepare a CAD file made in one of the many software designed for this purpose and save it in CSV or TXT format. Both of these formats contain a list of all the data needed to arrange the elements, such as position, rotation and type of element. There are many types of components that can be placed on the boards.

For the purpose of this article, we will describe the work of stacking one element, specifically the capacitor 0805 shown in Figure 13.

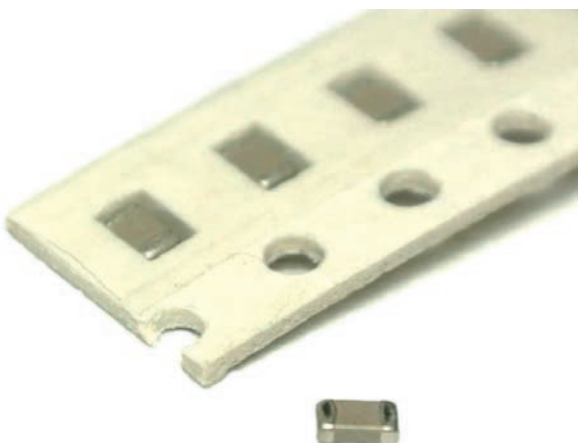


Fig. 13. Capacitor 0805 [12]

Next, the position of the PCB in the manipulator work area must be entered into the OpenPnP software, since the coordinates found in the files are counted from one of the corners of the PCB. There are usually three to four reference holes on PCBs. After checking the first, the manipulator then moves over the second and then the third (and then the fourth if there is one) and the whole process is repeated until the exact position and rotation of the PCB in the working field of the machine is calculated.

7.1. Automatic stacking

The next step is to switch on the automatic operation of the system. When the laying process begins, the robotic system starts by driving over the feeder with the elements. The software runs an algorithm to check the position of the reference holes of the strips, with the final result that all visible reference holes are found. Mounting several tapes next to each other is not a problem, because the instruction applied trims the image so that only the necessary fragment is visible.

It is also worth mentioning the lighting operation. LEDs should not be lit for the whole time the keypad is working, but only for a short moment when the image is taken from the camera. This is made possible by two applied scripts [13] written in JavaScript. The first one is run during the initialization of instructions related to reading the camera view. It checks which of the devices is to do this job and turns on the lighting intended for it, while turning off the LEDs located on the opposite side.

The operation of the second script is simpler than the previous one. Initially, a reference to the light switches is also written and then they are turned off. It is not necessary to use a conditional statement to check which lights were on, because turning off an unlit light does not cause any reaction. The entire process of retrieving the camera image takes less than a second.

After checking the position of the reference holes of the strip with elements, the software calculates a possible correction of the position if the circles found differ from what was stored in memory. Next, the X and Y axes are moved in such a way that the head is positioned exactly over the part to be picked. After its completion, the Z axis moves so that the tip of the head touches the element. At this point, the vacuum pump is activated and the part is lifted. Further, the manipulator moves the lifted component so

that it is in the centre of the lower camera image and at the same time at the height of the PCB on which it is to be placed. While performing this movement, it is also pre-rotated. Once the component is in the intended position, another image processing algorithm is run. In this case, the image is also bounded, this time by a circle, to reduce the number of elements that might impede the detection of the element.

The lighting used is red so that the element can be easily distinguished from the rest of the structure, which is done during stages three and four. Then the image is cleaned of noise and only a white imprint of the component on a black background remains. This ensures that the detected rotation and dimensions of the component are almost perfect. If the detected rotation angle of the component is different than the intended one, the head rotates by the calculated error. The algorithm does its job again if the correction is more than 5° . It also calculates the offset of the element from the centre of the image. The head does not always pick up the element exactly in the centre of its surface, which can cause small offsets during placement.

When all corrections have been calculated, the final sequence is executed. Z-axis rises to 0, X-axis and Y-axis move, positioning the capacitor exactly over the spot. The head then descends so that the component touches the plate and is pressed down. The end of the head is designed with a spring. This allows the component to be pressed against the PCB. When the movements are finished and the pressing time has passed (it was set at 1000 ms), the electro valve is switched on. The next movement is lifting the head to position 0. These movements are performed in parallel for both heads. When both elements are positioned, the algorithm starts from the beginning, i.e. the camera is positioned over the tape with elements, etc. When the last element has been positioned, the manipulator moves to the parking position and automatic operation is terminated.

7.2. Summary

The execution time depends on the complexity of the PCB design and the motor speed used. The more components to be placed, the longer the placement process will take. Increasing the speed will result in faster work with reduced accuracy. Also, be sure to provide enough components so that you don't run out of them while the job is being performed. If this hap-

pens, the algorithm will stop and the software will require user intervention. When the job is complete, the manipulator is in the parking position shown in Figure 14.

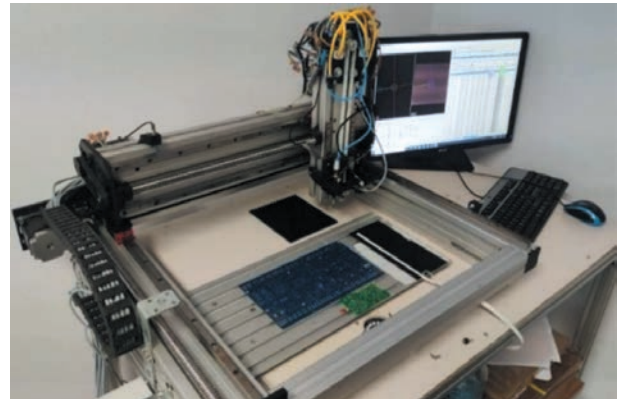


Fig. 14. Manipulator in the parking position

8. CONCLUSIONS

The construction of the Pick and Place manipulator is complex, mainly because of the required precision of operation. During the design and construction process of the machine, lessons were learned:

- When using the Mega2560 controller together with the RAMPS 1.6 overlay, it is not possible to directly control the LEDs. An additional Arduino Nano controller was required, which increased the cost of the design.
- The configuration of image processing algorithms requires frequent changes of lighting in order to select the most appropriate stages of its operation.
- The use of an off-the-shelf frame reduced the machine's construction costs, but it has a screw drive and is relatively heavy, resulting in low axle velocity, which increases the automatic stacking time.
- Mounting the manipulator to a table with wheels makes it easier to change the position of the machine, however, this makes it easier to cause shifting of elements placed in the working field, e.g. by accidental hitting the construction.
- In this article only the configuration for one SMD component was presented i.e. Capacitor 0805. For the full automatic placement of whole PCB project it would be necessary to make settings for each component.

The design of the manipulator allows for automatic placement of parts, but to achieve a reduction in machine time, several additional procedures can be

performed. The first step is to add and configure a second head. The mechanical design and electronic components of the robotic system have been adapted for this, which makes this process much easier. Another addition can be to construct automatic SMD component feeders. When these are mounted to the manipulator, it is possible to feed more components simultaneously, reducing the frequency of changing empty tapes. These would be controlled by using appropriate scripts.

The efficiency of the manipulator depends on the arrangement of PCBs on the working space and the arrangement of the feeders of SMD elements. The longer distance the head has to cover, the lower the productivity, however, after estimation the manipulator is able to place about 180–200 parts per hour.

References

- [1] Andurkar G.K., Borkar V.: *Development of Pick and Place Robot for Industrial Applications*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4, 9, 2017.
- [2] *Sneak Preview: DIY SMT Pick & Place Machine with OpenPnP*. <https://mcuoneclipse.com/2018/05/05/sneak-preview-diy-smt-pick-place-machine-with-openpnp/> [15.12.2020].
- [3] *Pick-and-Place Workflow using Stateflow for Matlab*. <https://www.mathworks.com/help/robotics/examples/pick-and-place-workflow-using-stateflow.html> [15.12.2020].
- [4] *LitePlacer standard kit*. https://www.liteplacer.com/shop20/index.php?route=product/product&product_id=64 [18.12.2020].
- [5] *The History of Industrial Robots, From Single Taskmaster to Self-Teacher*. <https://redshift.autodesk.com/history-of-industrial-robots/> [15.12.2020].
- [6] *JUKI RS-1R SMT Pick and Place Machine*. https://www.smt11.com/product/Pick-and-Place-Machine/JUKI-RS-1R-SMT-Pick-and-Place-Machine-78914.html#PRODUCT_CHARACTERISTICS [21.12.2020].
- [7] *BARR group: Introduction to Pulse Width Modulation (PWM)*. <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation> [23.12.2020].
- [8] *Coordinate System*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/User-Manual#coordinate-system> [29.12.2020].
- [9] Evans M., Noble J., Hochenbaum J.: *Arduino w akcji*. Helion, Gliwice 2014: 124–125.
- [10] *Setup and Calibration*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Setup-and-Calibration> [3.01.2021].
- [11] *Nozzle Tip Calibration Setup*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Nozzle-Tip-Calibration-Setup> [6.01.2021].
- [12] *Kondensator 0805*. http://www.sm-elektronik.pl/galerie/1/10uf-6-3v-x7r-smd-0805-kondens_5882.jpg [9.01.2021].
- [13] *Scripting*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Scripting> [10.01.2021].

KRYSTIAN SZOPA, Ph.D., Eng.

PAWEŁ KARELUS, Eng.

Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

AGH University of Science and Technology

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

kszopa@agh.edu.pl

pkarelus@student.agh.edu.pl

PAWEŁ KARELUS
KRYSTIAN SZOPA

Projekt i wykonanie trójosiowego manipulatora Pick and Place

W artykule przedstawiono projekt i wykonanie trójosiowego manipulatora Pick and Place, który oparty został na oprogramowaniu OpenPnP. Przeznaczony on jest do układania elementów SMD na płytkach PCB. Do wykonania projektu użyto gotowej ramy, która wymagała doboru odpowiednich silników i zaprojektowania wymaganych elementów dla osi Z, które zostały wykonane w programie Solidworks. Do skonstruowania manipulatora zastosowano napęd oparty na przekładni pasowej, jak i elementy pneumatyczne służące do podnoszenia komponentów. Dobrano i skonfigurowano również odpowiednie kamery wraz z oświetleniem, pozwalające na automatyczne sprawdzanie przebiegu pracy maszyny przez oprogramowanie. Kolejnym krokiem był dobór elementów elektrycznych maszyny i ich konfiguracja. Następnie skonfigurowano oprogramowanie OpenPnP i przygotowano je do automatycznego układania elementów SMD.

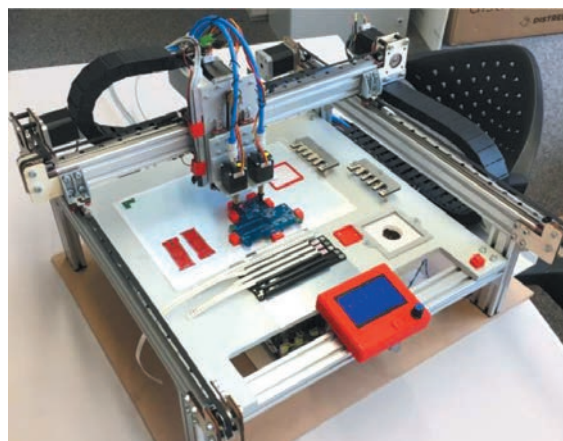
Słowa kluczowe: manipulator, pick and place, SMD, OpenPnP

1. WPROWADZENIE

Manipulatory Pick and Place [1], jak sama nazwa wskazuje, powinny wykonywać czynności związane z podnoszeniem i przenoszeniem komponentów z jednego miejsca na inne. Istnieje wiele rozwiązań takich konstrukcji, a dwa główne rozwiązania to: robotyczna ręka (rys. 1) oraz dwu- lub trójosiowy manipulator montażowy (rys. 2), który został opisany w tym artykule.



Rys. 1. Manipulator w stylu robotycznej ręki zaprojektowany przez AGH Space Systems



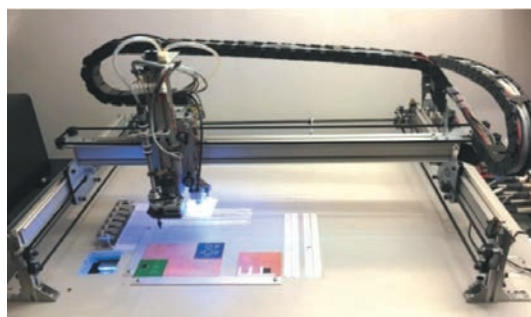
Rys. 2. Prosty trójosiowy manipulator montażowy [2]

Jego zadaniem będzie podnoszenie i układanie elementów SMD (ang. *Surface-mount device*, co tłumaczy się dosłownie jako urządzenie do montażu powierzchniowego. Skrót ten oznacza wszystkie elementy elektroniczne, które umieszczane są na powierzchni płytek PCB, tj. rezystory, kondensatory czy procesory) na płytkach obwodu drukowanego. W zakładach zajmujących się produkcją złożonych

komponentów elektronicznych na skalę masową takie manipulatory wykonują dużą część pracy. Jednak są one przemysłowe, to znaczy, że posiadają stosunkowo duże gabaryty, jak również są bardzo kosztowne w zakupie i utrzymaniu.

Małe zakłady, które wykonują projekty w liczbie niewielu sztuk, mogą zlecać złożenie płytki firmom zewnętrznym, jednak jest to również rozwiązanie drogie, a układanie elementów ręcznie często trwa wiele godzin i jest pracą męczącą z uwagi na jej dużą powtarzalność oraz niewielkie rozmiary elementów. W celu skrócenia czasu potrzebnego na ułożenie elementów można zastosować manipulator Pick and Place, który można zakupić lub też wykonać samemu. Pozwala to na uwolnienie pracownika. Może on w tym czasie wykonywać bardziej złożone zadania, kiedy maszyna wykonywać będzie prostą, powtarzalną i długo trwającą pracę.

Istnieje wielu komercyjnych producentów manipulatorów Pick and Place. Dostępne są konstrukcje o różnych wielkościach i różnej przepustowości, od mniejszych, mających pojedyncze głowice, do większych przemysłowych konstrukcji, mających kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt głowic [3–4]. Jednym z przykładów takiej maszyny dostępnej na rynku jest manipulator LitePlacer (rys. 3) produkowany przez fińską firmę o tej samej nazwie.



Rys. 3. Manipulator LitePlacer [3]

Dostępne są również konstrukcje przemysłowe mające bardzo dużą prędkość pracy i mogące układać dziesiątki tysięcy elementów na godzinę oraz mające setki wejść na różne elementy SMD, co jest potrzebne, jeżeli projekty płytek są skomplikowane. Służą one jednak do produkcji seryjnej i mają zastosowanie tylko w dużych zakładach. Jednym z dostępnych rozwiązań jest maszyna JUKI RS-1R (rys. 4), produkowana przez chińską firmę ETA. Taki manipulator stosowany jest jako część linii produkcyjnej, posiada automatyczne wejścia i wyjścia w postaci taśmociągów, dzięki którym można połączyć kilka maszyn wykonujących kolejne punkty procesu produkcyjnego.

Jego przepustowość wynosi około 47 000 części na godzinę, co wydaje się ogromną liczbą.



Rys. 4. Manipulator JUKI-RS-1 [4]

Jeżeli jednak koszty związane z kupnem manipulatora są zbyt wielkie, istnieje możliwość zaprojektowania własnego urządzenia z wykorzystaniem dostępnych darmowych środowisk do sterowania. Jest to jednak rozwiązanie czasochłonne i wymagające znajomości mechaniki i budowy maszyn, elektroniki oraz podstaw programowania.

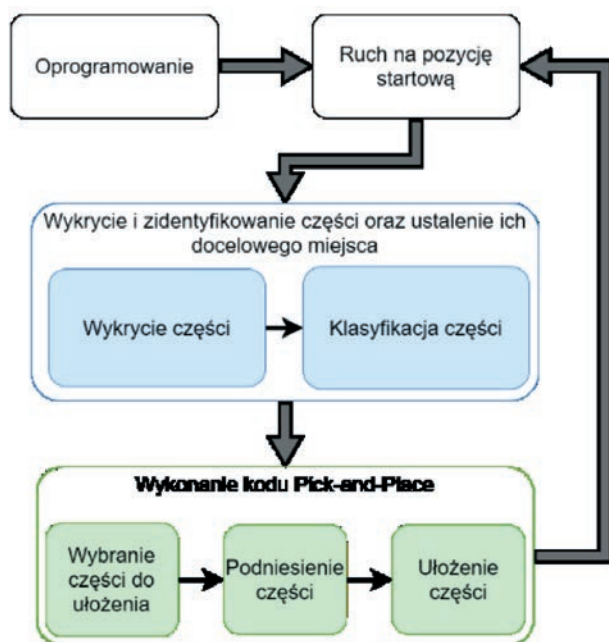
2. HISTORIA I CHARAKTERYSTYKA MANIPULATORÓW PNP

Historia manipulatorów Pick and Place sięga lat 30. XX wieku, jednak dopiero po drugiej wojnie światowej zostały stworzone pierwsze przemysłowe jednostki. Wraz z rozwojem technologii i ekonomii zapotrzebowanie na liczbę produkowanych przez zakłady artykułów znacząco rosło, zwiększyło to zainteresowanie maszynami, które będą wykonywały proste i powtarzalne czynności zamiast człowieka, zwłaszcza w środowisku zagrażającym zdrowiu lub życiu pracowników [5].

Algorytm pracy manipulatorów montażowych na pierwszy rzut oka nie jest skomplikowany. Wystarczy wykonać tylko kilka podstawowych kroków, które należy wielokrotnie powtórzyć. W praktyce skalibrowanie każdego kroku wymaga czasu z powodu wymaganej precyzji oraz powtarzalności.

Algorytm sterowania manipulatorem Pick and Place wymaga kilku kroków (rys. 5). Zacząć należy od projektu CAD płytki PCB z rozmieszczonymi w nim elementami, które mają zostać rozłożone. Następnie projekt ten wczytywany jest przez oprogramowanie zawarte na komputerze służącym jako główny sterownik urządzenia. Program ten dopasowuje poszczególne elementy na płytce do elementów na podajnikach oraz tworzy instrukcje w języku zrozumiałym dla sterownika elektronicznego, najczęściej jest to G-code.

Sterownik otrzymuje instrukcje i wykonuje je przez wysyłanie impulsów elektrycznych na odpowiednie złącza, co powoduje ruch maszyny w odpowiednich kierunkach, umożliwiając realizację zamierzonego celu. Do wykrywania poprawnego ułożenia podniesionych komponentów najczęściej używane są kamery, z których obraz jest przetwarzany przez oprogramowanie w odpowiedni sposób, który zostanie opisany w dalszej części artykułu.



Rys. 5. Schemat pracy manipulatora PnP [6]

3. OPIS WYKONANEJ KONSTRUKCJI

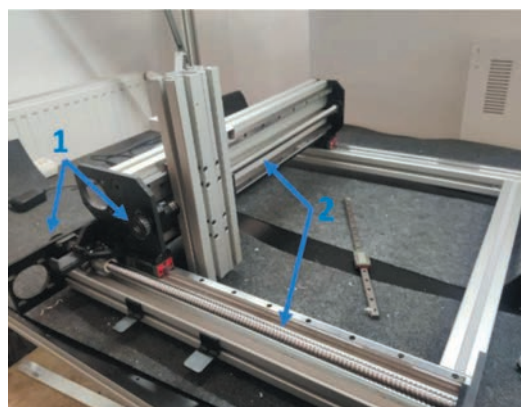
3.1. Przygotowanie projektu

Początek każdego projektu stanowią założenia oraz cele. W tym przypadku zostanie zastosowana wcześniej przygotowana rama (rys. 6). Pozwoliło to na zmniejszenie kosztów potrzebnych na skonstruowanie manipulatora, jak również skrócenie czasu na to poświęconego. Konstrukcja ta posiadała już gotowe osie X i Y z zastosowanym napędem śrubowym. Przyjęte etapy pracy przedstawiały się następująco:

- wybranie i zamontowanie silników napędzających osie,
- dobór przełożenia przekładni pasowych służących do napędzania osi X i Y,
- projekt oraz wykonanie osi Z wraz z mocowaniami na dwie głowice,
- wykonanie uchwytów na czujniki,
- montaż kamer,
- wykonanie okablowania maszyny,

- montaż manipulatora do stolika z kółkami,
- montaż tacek z elementami SMD,
- montaż zasilacza, kontrolerów, sterownika manipulatora oraz awaryjnego wyłącznika,
- poprawne podłączenie oraz konfiguracja sterownika za pomocą oprogramowania przeznaczonego dla drukarek 3D,
- konfiguracja oprogramowania OpenPnP.

Na początku więc zostanie wykonana konstrukcja mechaniczna manipulatora, następnie zostaną podłączone elementy elektroniczne, a ostatnim etapem będzie zainstalowanie i konfiguracja oprogramowania. Zastosowanie dwóch głowic motywowane jest tym, że przy planowanym użyciu napędu opartego o przekładnię pasową sterowanie nimi przebiega w prosty sposób. Zamocowanie ich po dwóch stronach jednego koła pasowego powoduje, że kiedy jedna głowica poruszana jest w jedną stronę, to druga porusza się w stronę przeciwną. Zastosowanie dwóch głowic oznacza też szybszą pracę manipulatora, niż kiedy zastosowana byłaby tylko jedna. Rysunek 6 pozwala zapoznać się z ogólną budową ramy.



Rys. 6. Początkowy wygląd zastosowanej ramy:
1 – napędy śrubowe; 2 – koła pasowe

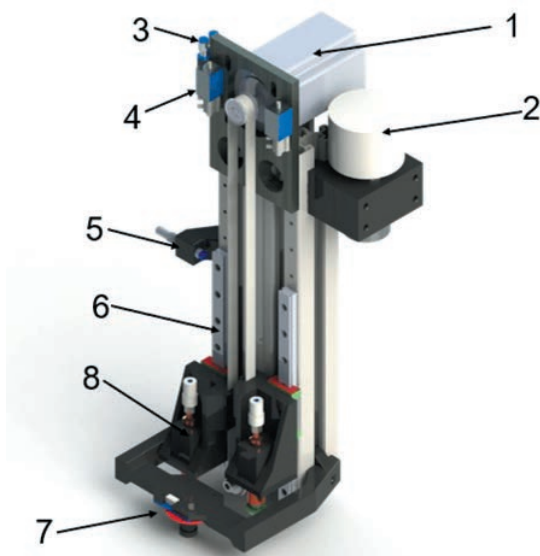
3.2. Konstrukcja mechaniczna

Z racji tego, że do skonstruowania manipulatora użyto gotowej ramy, niektóre elementy były wybrane wcześniej. Do takich elementów należy m.in. napęd śrubowy w kierunku osi X oraz Y, czy przenoszenie momentu z silnika, które odbywa się poprzez przekładnię pasową (oba elementy widoczne są na rys. 6). Jako że napędy te nie będą przenosić dużych momentów, a wymagana jest jak największa prędkość, dobrano przełożenie przekładni równe 1. Silniki dobrano tak, aby rozstaw montażowy otworów pokrywał się z otworami wykonanymi w ramie. Wybrano silniki

krokowe z serii Nema 24 – 60HS88 o momencie nominalnym 3 Nm. Koła pasowe zostały dobrane, biorąc pod uwagę te już zamontowane na śrubach napędowych, aby otrzymać założone przełożenie. Jedyнным możliwym sposobem okazał się dobór identycznej wersji kół, a mianowicie kół pasowych HTD 22-5M-09 posiadających 22 zęby i średnicę podziałową równą 35 mm. Osie zamocowane są do prowadnic liniowych na przeznaczonych specjalnie do nich wózkach, aby osiągnąć jak najmniejszy opór ruchu i stabilność konstrukcji.

3.3. Projekt osi Z

Projekt osi Z (rys. 7) został wykonany w programie Solidworks według przedstawionych wcześniej założeń. Wymagało to zamontowania silnika na osi wraz z przekładnią pasową, która ma napędzać głowice, które zostały zamocowane w specjalnie wydrukowanych uchwytach na prowadnicach liniowych oraz połączone bezpośrednio z przekładnią pasową. Spowodowało to naprzemienny ruch głowic. Na osi znajduje się też system pneumatyczny wywołujący podciśnienie w głowicy, umożliwiające podnoszenie elementów SMD.



Rys. 7. Projekt układu napędu w kierunku osi Z wykonany w programie Solidworks:

1 – silnik krokowy; 2 – pompa; 3 – rozdzielacz pneumatyczny; 4 – elektrozawór; 5 – indukcyjny czujnik krańcowy; 6 – prowadnica liniowa; 7 – kamera górna; 8 – głowica

Układ ten składa się z następujących elementów: pompki próżniowej, rozdzielacza, dwóch elektrozaworów pneumatycznych o jednym wejściu i dwóch wyjściach oraz przewodów pneumatycznych. Zada-

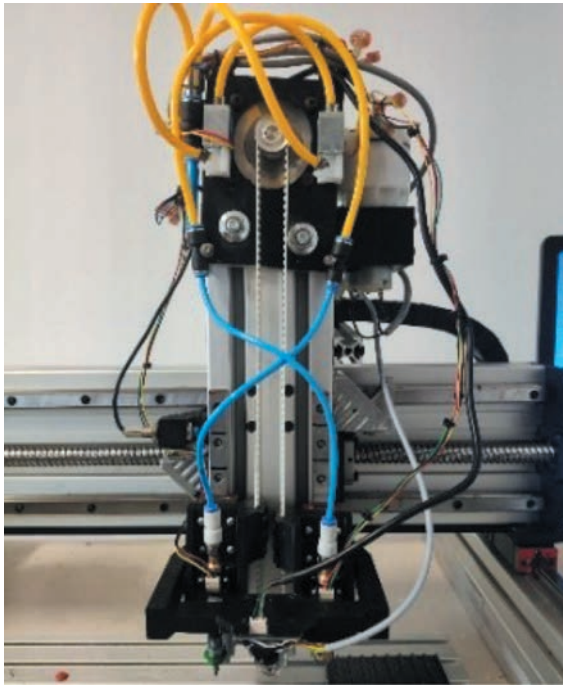
niem pompki jest wytwarzanie podciśnienia w przewodach, umożliwiającego podnoszenie elementów SMD. Głowica wykonana jest z wału drążonego pozwalającego jednocześnie na obrót końcówki wraz z elementem podniesionym za pomocą wspomnianego wcześniej podciśnienia. Do poprawnego funkcjonowania oprogramowania potrzebna jest też kamera, która będzie w stałej pozycji XY względem głowic. Umożliwia ona zarówno wykrywanie elementów na taśmach, jak i pozycji płytek PCB.

Na górnej części profilu aluminiowego został zamontowany zarówno silnik, jak i system pneumatyki. Silnik został zamocowany w taki sposób, aby możliwe było zamocowanie na jego trzpieniu koła zębatego, a samo mocowanie silnika umożliwia naciągnięcie paska. Użyto elektrozaworów z uwagi na to, że została zamocowana jedna pompka, jeżeli elementy mają być układane jeden po drugim, wyłączenie pompki skutkowałoby utratą wytworzonego podciśnienia w obu głowicach, co powodowałoby upuszczenie obu elementów. Przełączenie zaworu zamiast wyłączenia pompki pozwala na wyrównanie ciśnienia tylko w jednej głowicy. Rozdzielacz umożliwia podłączenie dwóch zaworów do jednej pompki. W modelu CAD nie zostały poprowadzone przewody pneumatyczne z uwagi na to, że są one podłączane luźno, więc trudno przewidzieć ich ułożenie.

Indukcyjny czujnik krańcowy (pozycja 5 na rys. 7) mocowany jest tak, aby można było w każdym momencie dostosować jego pozycję. Mocowanie do profilu aluminiowego odbywa się za pomocą śruby z nakrętką zamkową, co wraz ze specjalnie zamontowanym uchwytem powoduje sztywną pozycję po dokręceniu mocującej śruby. Sam czujnik posiada gwint na prawie całej swojej długości, co również daje możliwość dostosowania odpowiedniej pozycji.

Głowice (pozycja 8, rys. 7) odpowiedzialne za pracę podnoszenia i odkładania elementów montowane są w specjalnie zaprojektowanych uchwytach i mocowane za pomocą śrub do wózków na prowadnicach liniowych. Poprzez taką konstrukcję ich ruch odbywa się płynnie i bez problemów związanych z tarciem, dzięki połączeniu uchwytu do paska zębatego za pomocą specjalnie zaprojektowanego mocowania. Takie połączenie elementów ogranicza ruch przekładni do niewielkiego zakresu, jednak wymagany ruch głowicy jest niewielki.

Górna kamera (pozycja 7, rys. 7) powinna znajdować się w stałej odległości od głowic, dlatego również została zamocowana za pomocą odpowiednio zaprojektowanego uchwytu.



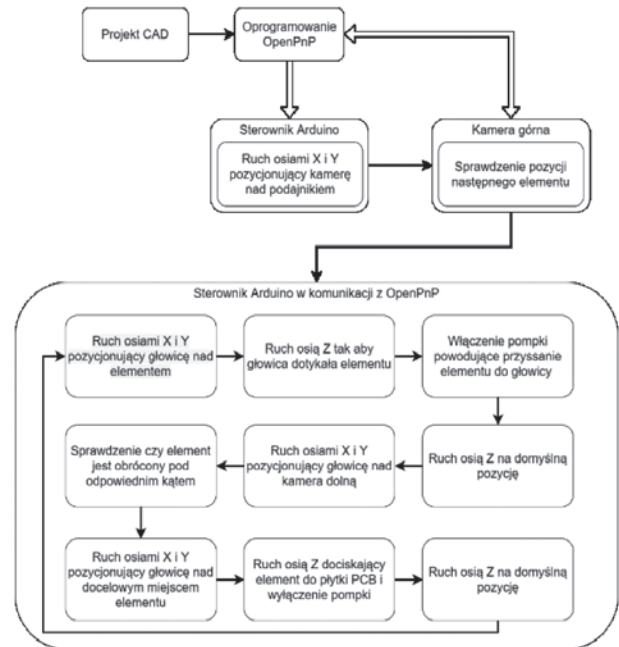
Rys. 8. Końcowy wygląd układu napędu w kierunku osi Z wraz z układem podnoszącym

Końcowy wygląd konstrukcji osi Z przedstawiony został na rysunku 8. Same przewody podłączone są krzyżowo, tj. lewy zawór podłączony jest do prawej złączki, a prawa złączka podłączona została do lewej głowicy. Rozwiązanie to powoduje większą swobodę ruchu przewodów podczas pracy głowicy oraz minimalizuje ostre zagięcia przewodów. Elementy SMD w większości nie posiadają dużej masy, jednak aby mieć pewność, że każdy większy mikroukład, jak np. procesor, został podniesiony prawidłowo, należało zadbać o jak największą wartość podciśnienia na końcu głowicy.

3.4. Algorytm sterowania

Sterowanie ruchami maszyny odbywa się automatycznie lub manualnie. Sposób manualny jest przewidziany do konfiguracji, każdy krok można wykonać samemu, uruchamiając poszczególne opcje w oprogramowaniu OpenPnP, jednak domyślnym sposobem jest sterowanie automatyczne. Aby było ono możliwe, wymagane jest wcześniejsze wprowadzenie wszystkich potrzebnych danych do programu i sterownika. Algorytm sterowania (rys. 9) przedstawiony jest tylko w przypadku sterowania automatycznego. Ruchy maszyny odbywają się na podstawie instrukcji wysyłanych w języku G-code. Instrukcje tworzone są przez program

OpenPnP wysyłane do mikrokontrolera Arduino, który konwertuje kod i przekazuje sygnały do odpowiednich komponentów maszyny, powodując ich ruch. Kod wysyłany jest na bieżąco, wymagane więc jest połączenie sterownika z komputerem przez cały okres pracy maszyny.



Rys. 9. Algorytm sterowania manipulatora

Nie wszystkie elementy są jednak podłączone bezpośrednio do sterownika. Kamera górna i dolna podłączana jest przez port USB do komputera obsługującego maszynę, aby oprogramowanie OpenPnP miało dostęp do obrazu i mogło odpowiednio dobrać parametry odległości czy obrotu, o który trzeba przesunąć głowicę. Drugim takim elementem są światła LED zamontowane przy kamerach. Służą one do oświetlania płytek i taśm z elementami SMD w przypadku kamery górnej oraz elementów przyssanych do głowicy w przypadku kamery dolnej. Podłączone są one do sterownika Arduino Nano, który następnie podpięty jest pod odpowiednie piny na głównym sterowniku. Sterowanie światłami opisane zostanie w dalszej części pracy.

4. ELEMENTY ELEKTRONICZNE I ICH OPROGRAMOWANIE

Do konstrukcji prostych manipulatorów PnP najczęściej wykorzystuje się elementy stworzone do obsługi drukarek 3D, są one łatwo dostępne, nie są kosztowne

oraz stosunkowo łatwo można je skonfigurować do obsługi manipulatora. Jednym z najważniejszych praktycznych wymagań jest to, aby oprogramowanie sterownika było w stanie obsługiwać oryginalnie dwa ekstrudery w drukarce, jeżeli jednak tak nie jest, można zmienić kod konfiguracyjny w taki sposób, aby manipulator był obsługiwany, jednak jest to zdecydowanie utrudnione. Biorąc to pod uwagę, skorzystano z mikrokontrolera MEGA 2560 wraz z nakładką RAMPS 1.4. Nakładka ta jest rozszerzeniem mikrokontrolera MEGA 2560, umożliwia ona podłączenie silników krokowych wraz ze sterownikami silników krokowych. Wybrano prosty i niedrogi sterownik A4988, którego potrzebne są docelowo dwie sztuki, jeden sterownik obsługuje tylko jeden silnik, jednak nie są one w stanie sterować silnikami osi X, Y oraz Z. Ich zadaniem jest obsługiwanie osi obrotu. Jeden z tych sterowników jest zamontowany z myślą o przyszłej rozbudowie maszyny. Do sterowania silnikami głównych trzech osi wybrano dwufazowy sterownik HY-DIV268N-5A. Ma on możliwość prostej zmiany natężenia prądu oraz liczby mikrokroków. Taka konfiguracja pozwala na bezproblemowe sterowanie dobranymi silnikami krokowymi. RAMPS daje również możliwość podłączenia czujników krańcowych, z których również skorzystano w tym projekcie. Korzystając z pozostałych pinów, można sterować dodatkowymi elementami, w przypadku manipulatora są to elektrozawory, pompka czy światła LED, do których potrzebne jest jeszcze Arduino Nano, ponieważ sygnał wychodzący z mikrokontrolera jest sygnałem PWM (*Pulse-Width Modulation* [7]). Mikrokontroler wysyła wartości zaczynające się od 0 aż do 255, jest to więc sygnał cyfrowy, który nie jest w stanie zasilić światła. Sygnał wysyłany jest więc do mikrokontrolera Arduino Nano, który po otrzymaniu wartości 0 zapala światła, a przy otrzymaniu wartości większej gasi je. W praktyce te trzy elementy, nie wliczając Arduino Nano, tworzą całość. Nie jest wymagana konfiguracja każdego elementu osobno, oprogramowanie sterownika drukarki 3D wgrywane jest na główny mikrokontroler, tj. Mega 2560, który steruje resztą bez potrzeby zewnętrznej konfiguracji. Dodając do tej konfiguracji dodatkowy mikrokontroler, otrzymujemy możliwość rozszerzenia manipulatora o dodatkowe elementy, w przypadku tej maszyny są to światła LED, jednak w przyszłości można rozbudować konstrukcję, podłączając do niego również np. automatyczne podajniki elementów SMD.

4.1. Konfiguracja mikrokontrolera MEGA

Najważniejszymi zmianami w domyślnej konfiguracji mikrokontrolera było:

- wybranie szybkości transmisji komunikacji sterownika z komputerem,
- ustawienie minimalnej i maksymalnej wartości pozycji poszczególnych osi,
- poprawne ustawienie czujników krańcowych (normalnie otwarte, oś X i Y – czujnik minimalny, oś Z – czujnik maksymalny),
- ustawienie rozdzielczości silników krokowych oraz ich maksymalnej prędkości i przyspieszenia.

W związku z tym, że zastosowane oprogramowanie przeznaczone jest dla drukarek 3D, przewidziane w nim zostały tylko trzy osie. Aby można było użyć czwartej osi, która działa jako obrót głowicy, została ona podłączona do złącza ekstrudera, co wymagało wyłączenia obsługi czujników temperatury stosowanych w drukarkach.

Po ustawieniu wszystkich opcji gotowy program został zainstalowany na sterowniku. Następnym krokiem było skonfigurowanie mikrokontrolera Arduino Nano.

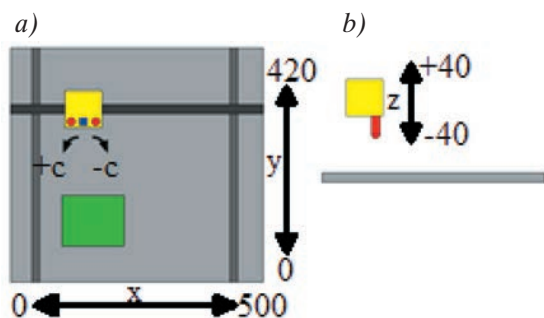
4.2. Konfiguracja mikrokontrolera Arduino Nano

Płytki z diodami LED są przymocowane do uchwytów kamer. Ich zadaniem jest oświetlanie manipulatora, kiedy oprogramowanie pobiera obraz. Z racji tego, że zamontowane są one równolegle do siebie, lecz w przeciwnych kierunkach, nie powinny być one zapalone przez cały czas pracy maszyny. Światło oświetlające obraz dolnej kamery może skutkować zakłóceniami występującymi na obrazie pochodzącym z górnej kamery i odwrotnie. Z tego powodu konfiguracja mikrokontrolera nie jest wystarczająca, aby uzyskać poprawną pracę światła, jednak jest to pierwszy krok. Do pinów 7 oraz 8 urządzenia podłączono kable przenoszące sygnał włączający. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego kodu, można sterować zapalaniem i gaszeniem światła, podając niskie i wysokie napięcie. Płytki z diodami LED połączone są szeregowo. Na każdej znajduje się 16 diod. Zastosowanie prostych instrukcji warunkowych pozwala na włączenie całej płytki praktycznie jednocześnie, jeżeli napięcie na wyjściu zmieni się na niskie. Kolor podawany jest w formacie RGB – wartość 250, 0, 0 oznacza, że światła świecą się na kolor czerwony. Odcień

ten został wybrany dlatego, iż żadna część konstrukcyjna manipulatora nie jest w tym samym kolorze oraz powoduje zauważalnie mniejsze odbicia światła niż przy zastosowaniu światła białego.

5. KONFIGURACJA OPROGRAMOWANIA OPENPNP

Zapewnienie poprawnego działania manipulatora wymaga również odpowiednio skonfigurowanego oprogramowania nim sterującego. Na początku sprawdzono, czy wszystkie osie i czujniki działają poprawnie. Środowisko OpenPnP wymaga układu współrzędnych maszyny przedstawionego na rysunku 10. Gdy upewniono się, że elementy konstrukcji działają poprawnie, przystąpiono do wyznaczenia kroków na milimetr dla silników krokowych.



Rys. 10. Układ współrzędnych manipulatora:
a) widok z góry; b) widok z boku [8]

Rozdzielczość silników krokowych można bardzo łatwo obliczyć dzięki podzieleniu liczby 360 przez kąt kroku silnika [9], który wynosi $1,8^\circ$. Obliczona w ten sposób wielkość określa liczbę potrzebnych kroków do pełnego obrotu silnika. Aby obliczyć jednak wartość kroków na milimetr, należy skorzystać ze wzoru dla napędów śrubowych:

$$k_r = \frac{l_k \cdot m_k}{P} \quad (1)$$

gdzie:

- l_k – liczba kroków silnika na pełen obrót,
- m_k – liczba mikrokroków,
- P – skok gwintu śruby napędowej.

Przyjęto 16 mikrokroków. Do wzoru potrzebna jest znajomość również skoku gwintu śruby napędowej, który wynosi 8 mm. Znajac wszystkie te wartości, możemy je podstawić do wzoru (1), otrzymując:

$$k_r = \frac{200 \cdot 16}{8} = 400 \quad (2)$$

Wynika z tego to, że przemieszczenie się osi o 1 mm wymaga wykonania przez silnik 400 kroków. Aby mieć pewność, czy wartość została poprawnie obliczona, należy ją jednak sprawdzić w praktyce.

Do kalibracji podstawowych ustawień oprogramowania OpenPnP skorzystano z instrukcji dostępnej w serwisie Github [10] opracowanej przez twórców.

5.1. Początkowe ustawienia oprogramowania

Pierwszym krokiem jest instalacja oprogramowania OpenPnP. Rozpocząć należy od wybrania sterownika oprogramowania, aby mogło ono poprawnie komunikować się z mikrokontrolerem. Dla wszystkich konstrukcji, w których sterowanie opiera się na języku G-code, przeznaczony jest sterownik „Gcode-Driver”. Następnie należy wybrać port oraz prędkość równą 115 200 Bd (bod, ang. *Baud* – miara określająca prędkość przesyłania zmian medium transmisyjnego).

5.2. Kalibracja górnej kamery

Pierwszym kalibrowanym elementem jest górna kamera, która zamontowana jest na osi Z. W kamerach podłączanych przez porty USB zalecane jest użycie sterownika OpenPnP Capture Camera i taki właśnie został wybrany. Jest to kod umożliwiający poprawny odczyt obrazu kamery przez oprogramowanie pozwalający również na jej kontrolowanie. Ustawiono również format obrazu. Parametry przetwarzania obrazu kamery, np. jasność, nasycenie czy balans bieli zostały dobrane tak, aby o każdej porze dnia obraz wyglądał podobnie. Pozwala to na poprawne działania algorytmów przetwarzających obraz, np. w celu wykrycia elementu SMD na taśmie bez względu na to, czy manipulator znajduje się w oświetlonym pomieszczeniu czy nie.

Górną kamerę, dla najlepszego zobrazowania, nazwano *Camera Top*. Jednym z najważniejszych ustawień jest kalibracja jednostek (w tym przypadku milimetrów) na piksel obrazu. Jeżeli parametr ten jest niepoprawnie zmierzony, może to skutkować błędną pracą maszyny, ponieważ w niektórych krokach algorytmu pracy mierzona jest odległość rzeczywista na podstawie obrazu. Obliczone wartości wynoszą 0,0662 mm na piksel obrazu. Górna kamera jest dla oprogramowania punktem zero. Kolejnymi ustawieniami są transformacje obrazu pochodzącego z kamer.

Zgodnie z zaleceniami obraz z górnej kamery powinien wyglądać jak to, co widzi osoba patrząca z góry na manipulator, czyli w górnej części obrazu powinny znajdować się elementy bardziej wysunięte w osi X. Jeżeli zamocowana kamera nie dostarcza takiego obrazu, można odwrócić go w pionie, w poziomie lub obrócić o zadany kąt. Można również wykadrować obraz, jest to operacja przydatna, ponieważ obiektyw kamery przypomina półsferę. Powoduje to, że na obrazie nie jest zachowana stałość wymiarów (liczba pikseli na milimetr w okolicy środka obrazu nie jest równa liczbie pikseli na milimetr przy krańcach obrazu).

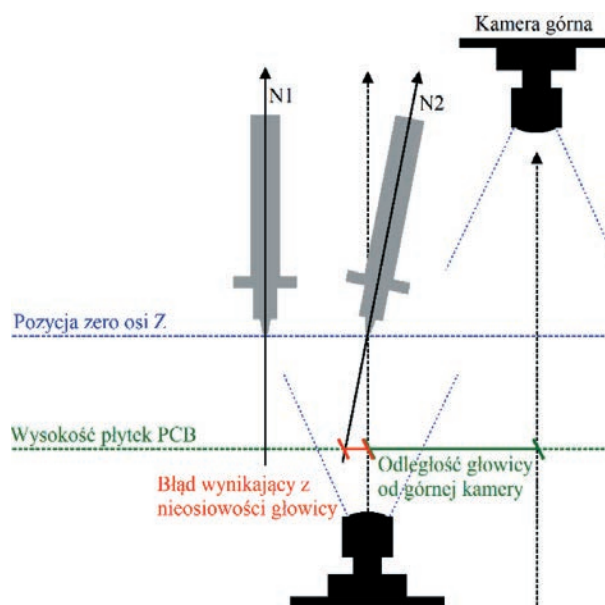
5.3. Kalibracja dolnej kamery

Konfiguracja dolnej kamery przebiega podobnie do konfiguracji kamery górnej, jednak ustawione wartości różnią się, ponieważ element ten ustawiony jest w innym miejscu i odpowiedzialny jest za wykrywanie obrotu podniesionych już części oraz pozycji końcówki głowicy. Kamrę nazwano *Bottom Camera* (kamera dolna), aby zachować motyw nazewnictwa. Obliczono również wartość milimetr na piksel obrazu równą 0,017 mm. Ustawienia transformacji obrazu zostały również dobrane w ten sposób, aby był on podobny w każdych warunkach zewnętrznego oświetlenia. Jednym z ważniejszych ustawień dolnej kamery jest ustalenie takiej jej pozycji, w której końcówka głowicy znajduje się idealnie na środku wizji. Nie da się tego obliczyć bez wcześniejszego obliczenia odległości, w jakiej znajduje się głowica od kamery górnej będącej punktem zero dla oprogramowania.

5.4. Kalibracja głowicy

Na początku skonfigurowano tylko jedną głowicę, aby łatwiej można było sprawdzić poprawność działania konstrukcji. Nadano jej nazwę N1. Następnie, aby umożliwić automatyczną obsługę elementów pneumatycznych, dodano odpowiednie włączniki, które wysyłają komendy w języku G-code, powodujące włączenie lub wyłączenie odpowiednich podzespołów. Utworzono więc włącznik *Vaccum* (próżnia), który powoduje włączenie lub wyłączenie pompki oraz dwa włączniki N1_VAC oraz N2_VAC (oznaczające elektrozawory dla głowicy pierwszej i drugiej). Następnym krokiem konfiguracji było określenie, w jakiej

odległości głowica znajduje się od punktu zero manipulatora. Wykonanie tej czynności pozwoliło również na określenie miejsca znajdowania się dolnej kamery. Określenie pozycji kamery pozwoliło również na ustalenie błędu nieosiowości maszyny, który jeżeli jest zbyt duży, może wpłynąć na nieprawidłowe wykonywanie pracy przez manipulator.



Rys. 11. Wizualizacja błędu nieosiowości [11]

Jak widać na rysunku 11, jeżeli głowica nie jest zamocowana w osi prostopadłej do płaszczyzny płytek PCB, skutkuje to przesunięciem. Dodatkowo, jeżeli sama głowica nie jest wykonana z zachowaniem współosiowości albo końcówka głowicy zamontowana jest w sposób powodujący nieosiowość, trudne jest określenie punktu, w którym końcówka głowicy dotknie płytki PCB, ze względu na to, iż przesunięcie zmienia kierunek i/lub wartość razem z obrotem silnika głowicy. Do tego procesu używany jest więc algorytm przetwarzający obraz z kamery i wykrywający końcówkę głowicy. Po ustaleniu pozycji dolnej kamery końcówka głowicy powinna znajdować się w centrum, następnie algorytm wykonuje obroty silnikiem głowicy tak, aby ich suma wyniosła 360°. Daje to pogląd, jak zmienia pozycję końcówka głowicy pod względem obrotu w każdym miejscu. Po wykonaniu każdego z pojedynczych ruchów obrotowych pobierany jest widok z kamery i przetwarzany przez specjalnie dobrane algorytmy tak, aby wykrywał, w jakim miejscu znajduje się powierzchnia styku. Składa się on z kilku mniejszych etapów, które finalnie powinny doprowadzić do wykrycia jednego okręgu pokrywają-

cego się z końcówką głowicy. Dzięki temu wraz z obliczoną wcześniej liczbą milimetrów na piksel kamery dolnej algorytm jest w stanie obliczyć, ile wynosi błąd nieosiowości przy danym obrocie silnika. Wynik ten jest zapisywany, a następnie dodawany lub odejmowany przy wykonywaniu automatycznych ruchów. Należy jednak wziąć również pod uwagę fakt, iż w osi obrotu głowicy nie jest zamocowany żaden czujnik krańcowy. Powoduje to ustawianie pozycji obrotu do wartości 0 przy każdym włączeniu maszyny, przez co dodawane wartości mogą nie działać poprawnie i zwiększać błąd, zamiast go niwelować. Ważne więc jest, aby kalibracja ta odbywała się po każdym bazowaniu manipulatora.

5.5. Bazowanie manipulatora

Po włączeniu zasilania maszyny pozycja osi ustawiana jest automatycznie do wartości 0. Aby oprogramowanie знаło więc dokładną pozycję maszyny, należy wykonać operację bazowania. Składa się ona z trzech etapów:

1. dojazd osiami do krańcówek według ręcznie wpisanego kodu G-code,
2. dojazd kamerą nad specjalny punkt znajdujący się na stole o niezmienniej pozycji, aby zapewnić jak największą powtarzalność bazowania,
3. dojazd głowicą nad dolną kamerę, aby dokonać kalibracji błędu nieosiowości (opisane w poprzednim podrozdziale).

Etap pierwszy składa się z kilku komend w języku G-code. Zapewniają one bezpieczny dojazd każdej z osi do czujników krańcowych. Przy automatycznym bazowaniu należy pamiętać, że może zdarzyć się sytuacja, kiedy głowica będzie znajdowała się w pozycji niskiej.

Elementy SMD są często niewielkich wymiarów, należy więc korzystać z każdej dostępnej opcji zwiększania precyzji. Do jednej z tych opcji zaliczyć można ruch kamery nad specjalnie przygotowany czarny punkt znajdujący się na stole o niezmienniej pozycji w stosunku do konstrukcji. W pliku konfiguracyjnym została zawarta jego pozycja, więc po wykonaniu pierwszego etapu bazowania i przesunięciu nad ten punkt jeden z algorytmów przetwarzania obrazu kamery sprawdza, czy znajduje się on idealnie pod kamerą. Jeżeli nastąpi przesunięcie, pozycja maszyny jest korygowana. Kiedy punkt nie zostanie wykryty,

operacja bazowania zostaje przerwana i należy wykonać ją jeszcze raz. Następnym etapem jest dojazd głowicą nad dolną kamerę w celu obliczenia błędu nieosiowości. Jeśli jednak nie zostanie ona poprawnie obliczona, operacja bazowania również zostaje przerwana.

6. ALGORYTMY PRZETWARZANIA OBRAZU

Aby możliwa była automatyczna praca manipulatora, wymagane są odpowiednie algorytmy, które wykrywać będą potrzebne elementy na obrazie pochodzącym z kamery. Jeden algorytm składa się z kilku mniejszych algorytmów, które można dobierać zgodnie z wymaganiami, finalnie doprowadzając do wykrycia elementu. Oczywiście różnią się one w zależności od tego, jaki komponent trzeba wykryć. Dobranie odpowiednich algorytmów powinno być przeprowadzone po konfiguracji obrazu pochodzącego z kamery. Ważne jest, aby algorytmy pracowały podobnie w różnych warunkach oświetlenia.

Ogólna zasada działania algorytmów obrazu jest jednak podobna. Każdy z nich zaczyna od pobrania klatki pochodzącej z obrazu kamery po upływie czasu ustalania. Następnie zmniejsza pobraną klatkę w celu zminimalizowania ilości elementów znajdujących się na obrazie. Kolejno wykonywane są operacje przetwarzania obrazu i końcowym efektem jest narysowanie na pobranej początkowo klatce wykrytego elementu – prostokąta lub okręgu. Jednak algorytmów stosowanych przez oprogramowanie do obsługi kamery jest wiele z powodu tego, że służy ona do wykrywania podniesionych elementów SMD. Algorytmy wykorzystywane przez kamerę dolną można podzielić na dwa główne kierunki, ponieważ te stosowane do wykrywania podniesionych części wyglądają bardzo podobnie, w większości różnią się tylko wyborem pojedynczych wartości w etapach procesu wykrywania.

Drugi algorytm służy do wykrywania końcówki głowicy. Składa się on z ośmiu etapów przedstawionych i opisanych poniżej. Powinny one być dobrane w taki sposób, aby wykrywany był tylko jeden okrąg znajdujący się dokładnie na końcu głowicy. Dopuszczalne są jednak niewielkie odchylenia, jeżeli na przykład wykryty okrąg jest mniejszy lub większy od końcówki głowicy, ale jego środek pokrywa się z rzeczywistym

środkiem elementu, nie powoduje to problemów, ponieważ oprogramowanie bierze pod uwagę tylko punkt środkowy. Końcówka głowicy jest jedna, więc na obrazie nie powinno znajdować się więcej narysowanych okręgów. Etapy algorytmu przedstawiają się następująco [9]:

1. ImageCapture – po upływie czasu ustalania kamery pobierana jest jedna klatka pochodząca z obrazu dolnej kamery.
2. MaskCircle – algorytm ten ogranicza pobraną wcześniej klatkę kołem o średnicy 350 pikseli, pozostała część obrazu pokrywana jest czarnym kolorem.
3. Bgr2Gray – wykonywana jest konwersja kolorów z systemu BGR (24-bitowy zapis wartości koloru) na system odcieni szarości.
4. Threshold – algorytm ten zamienia obraz na dwukolorowy – czarny i biały.
5. BlurMedian – wykonywane jest uśrednianie pikseli. Powoduje to usunięcie szumów z obrazu.
6. DetectCirclesHough – algorytm ten stosowany jest do wykrywania okręgów o średnicy mieszczącej się w zadanym zakresie znajdujących się na obrazie.
7. ImageRecall – algorytm ten nadpisuje przetworzony obraz na początkowo pobraną klatkę.
8. DrawCircles – algorytm ten rysuje wykryte w etapie 6 okręgi na przywołanej w poprzednim kroku klatce.

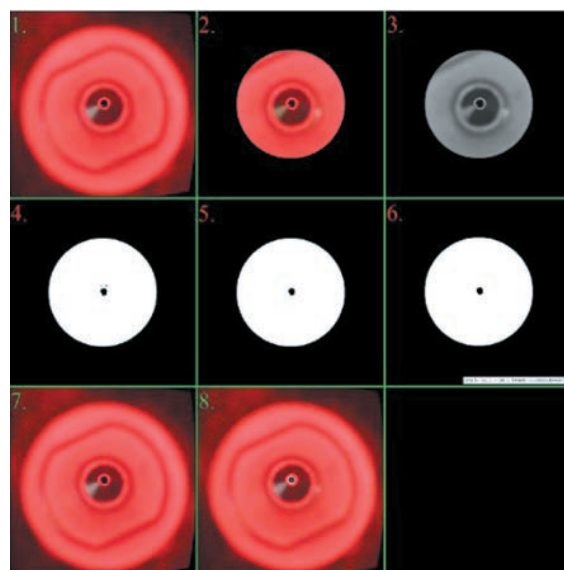
Algorytmy używane przez kamerę główną różnią się od tych stosowanych przez dolną, ponieważ służą one głównie do wykrywania otworów referencyjnych na taśmie z elementami czy płytkach PCB. Podczas automatycznej pracy manipulator przesuwa górną kamerę nad pozycję, w której powinien znajdować się następny element do podniesienia i sprawdza, gdzie i czy znajdują się otwory referencyjne taśmy. Dzięki temu nie jest wymagane bardzo dokładne kalibrowanie długich taśm (przy których ewentualny błąd byłby bardziej zauważalny), ponieważ przy każdym podniesieniu oprogramowanie sprawdza i wykonuje ewentualną poprawkę pozycji.

W teorii algorytm wykrywania otworów referencyjnych może przypominać ten służący do wykrywania końcówki głowicy. Jednak z powodu różnych ustawień kamer oraz różnych warunków oświetlenia tych elementów algorytmy te musiały być dobrane w inny sposób. Ostatnim już sposobem wykrywania elementów jest algorytm służący do znajdowania otworów referencyjnych na płytkach PCB. Używany jest on do

automatycznego ustalania pozycji płytki w polu roboczym. Oszczędza to pracy użytkownikowi, ponieważ elementy muszą być ułożone z bardzo dużą dokładnością, więc ręczne ustalanie pozycji przy każdym rozpoczynaniu pracy byłoby uciążliwe.

7. OPIS PRACY MANIPULATORA

Po skonfigurowaniu manipulatora można przystąpić do wykonania pierwszej automatycznej pracy maszyny. Po włączeniu maszyny należy zacząć od konfiguracji błędu nieosiowości. Praca algorytmu wykrywającego końcówkę głowicy pokazana jest na rysunku 12. Jak można na nim zauważyć, obraz najpierw ograniczany jest okręgiem, a następnie jego kodowanie zmieniane jest na odcienie szarości. W kolejnym etapie wykrywane są piksele, które znajdują się powyżej wybranej intensywności skali szarości. Obraz czyszczony jest z zakłóceń i w etapie 6 znajduje się okrąg. Etap 8 pokazuje, że algorytm zadziałał poprawnie. Instrukcje te wykonywane są dla 6 różnych obrotów głowicy, aby wykryć błąd przy aktualnej konfiguracji osi głowicy.

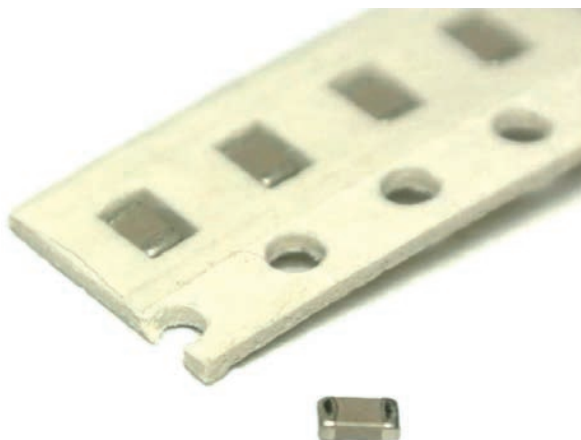


Rys. 12. Praca algorytmu wykrywającego końcówkę głowicy manipulatora (numeracja zgodna z algorytmem przedstawionym w części 6 artykułu)

Kolejnym krokiem jest przygotowanie pliku CAD wykonanego w jednym z wielu oprogramowań do tego przeznaczonych i zapisaniu go w formacie CSV lub TXT. Oba te formaty zawierają spis wszystkich danych potrzebnych do ułożenia elementów, tj. pozy-

cja, rotacja czy rodzaj elementu. Występuje wiele rodzajów komponentów układanych na płytkach.

Na potrzeby tego artykułu opisana zostanie praca układania jednego elementu, a dokładnie kondensatora 0805 przedstawionego na rysunku 13.



Rys. 13. Kondensator 0805 [12]

Następnie należy wpisać do oprogramowania OpenPnP pozycję płytki PCB w polu roboczym manipulatora, ponieważ koordynaty znajdujące się w plikach liczone są od jednego z rogów płytki. Na płytkach PCB znajduje się zazwyczaj od trzech do czterech otworów referencyjnych. Po sprawdzeniu pierwszego manipulator porusza się więc nad drugi, a następnie trzeci (potem czwarty, jeżeli istnieje) i cały proces jest powtarzany, aż obliczona jest dokładna pozycja i obrót płytki PCB w polu roboczym maszyny.

7.1. Automatyczne układanie

Kolejną czynnością jest już włączenie automatycznej pracy manipulatora. Po rozpoczęciu procesu układania manipulator podjeżdża nad podajnik z elementami. Oprogramowanie wykonuje algorytm sprawdzenia pozycji otworów referencyjnych taśm, którego końcowym wynikiem jest znalezienie wszystkich widocznych otworów referencyjnych. Zamontowanie kilku taśm obok siebie nie sprawia problemu, ponieważ zastosowana instrukcja przycina obraz tak, aby widoczny był jedynie potrzebny jego fragment.

Warto również wspomnieć o pracy oświetlenia. Diody LED nie powinny być zaświecone przez cały czas pracy manipulatora, a jedynie przez krótką chwilę, kiedy obraz jest pobierany z kamery. Umożliwiają to dwa zastosowane skrypty [13] napisane w języku JavaScript. Pierwszy z nich uruchamiany jest podczas

inicjalizacji instrukcji związanych z odczytaniem widoku kamery. Sprawdza on, które z urządzeń ma wykonać tę pracę, i włącza przeznaczone dla niego oświetlenie, jednocześnie wyłączając diody znajdujące się po przeciwnej stronie.

Działanie skryptu drugiego jest prostsze od poprzednika. Początkowo również zapisywane jest odwołanie do włączników oświetlenia, a następnie są one wyłączane. Nie jest potrzebne zastosowanie instrukcji warunkowej, aby sprawdzać, które z diod były włączone, ponieważ wyłączenie niezapalonego oświetlenia nie wywołuje żadnej reakcji. Cały proces pobrania obrazu z kamery trwa niecałą sekundę.

Po sprawdzeniu pozycji otworów referencyjnych taśmy z elementami oprogramowania oblicza ewentualną poprawkę pozycji, jeżeli znalezione okręgi różnią się od tego, co było zapisane w pamięci. Następnie wykonywany jest ruch osiami X oraz Y pozycjonujący głowicę dokładnie nad pobieranym elementem. Po jego zakończeniu oś Z porusza się tak, aby końcówka głowicy dotykała elementu. W tym momencie włączana jest pompka tworząca podciśnienie i część jest podnoszona. Dalej manipulator przesuwa podniesiony komponent tak, aby znajdował się on w środku obrazu dolnej kamery i jednocześnie na wysokości płytki PCB, na której ma zostać ułożony. Podczas wykonywania tego ruchu jest on też wstępnie obracany. Kiedy element znajduje się już w zamierzonej pozycji, uruchamiany jest kolejny algorytm przetwarzania obrazu. W tym przypadku obraz również jest ograniczany, tym razem okręgiem, aby zminimalizować liczbę elementów mogących utrudniać wykrycie komponentu.

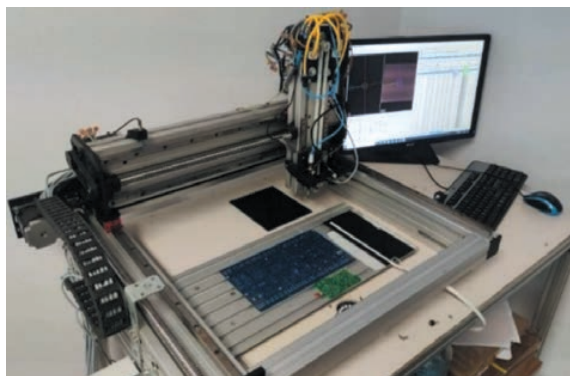
Zastosowane oświetlenie ma kolor czerwony, co pozwala na łatwe odróżnienie elementu od reszty konstrukcji, co wykonywane jest podczas etapu trzeciego i czwartego. Następnie obraz czyszczony jest z zakłóceń i pozostaje jedynie biały odcisk elementu na czarnym tle. Dzięki temu wykryty obrót oraz wymiary komponentu są prawie idealne. Jeżeli wykryty kąt obrotu elementu jest inny niż ten zamierzony, głowica obraca się o wyliczony błąd. Algorytm wykonuje swoją pracę jeszcze raz, jeżeli poprawka wynosi więcej niż 5°. Oblicza on również odsunięcie elementu od środka obrazu. Głowica nie zawsze podnosi element dokładnie w centrum jego powierzchni, co może powodować nieduże przesunięcia przy układaniu.

Kiedy zostaną obliczone wszystkie poprawki, wykonywana jest sekwencja końcowa. Oś Z podnosi się na pozycję 0, osie X i Y wykonują ruch, pozycjonując

kondensator dokładnie nad miejscem ułożenia. Następnie głowica zniża się tak, aby komponent dotykał płytki oraz był dociśnięty. Końcówka głowicy jest skonstruowana z użyciem sprężyny. Pozwala to na docisk elementu do płytki PCB. Kiedy ruchy zostaną zakończone oraz minie czas docisku (został on ustawiony na 1000 ms), przełączany jest elektrozawór. Kolejnym wykonywanym ruchem jest podniesienie głowicy do pozycji 0. Ruchy te wykonywane są równolegle dla obu głowic. W momencie kiedy oba elementy są ułożone, algorytm pracy zaczyna od początku, tj. kamera ustawiana jest nad taśmą z elementami itd. Jeżeli ułożony został ostatni element, manipulator przesuwa się na pozycję parkingową i automatyczna praca zostaje zakończona.

7.2. Podsumowanie

Czas wykonywania pracy jest zależny od złożoności projektu płytki PCB oraz zastosowanej prędkości silników. Im więcej elementów do ułożenia, tym dłużej trwa proces układania. Zwiększenie prędkości spowoduje szybsze wykonywanie pracy przy zmniejszeniu dokładności. Należy również pamiętać o zapewnieniu odpowiedniej liczby komponentów, aby podczas wykonywania pracy ich nie zabrakło. Jeżeli tak się stanie, algorytm zostanie zatrzymany i oprogramowanie będzie wymagało interwencji użytkownika. Po zakończeniu pracy manipulator znajduje się w pozycji parkingowej pokazanej na rysunku 14.



Rys. 14. Manipulator znajdujący się w pozycji parkingowej

8. WNIOSKI

Budowa manipulatora Pick and Place jest skomplikowana głównie z powodu wymaganej precyzji

działania. Podczas procesu projektowania i konstrukcji maszyny wyciągnięto wnioski:

- Przy zastosowaniu sterownika Mega2560 wraz z nakładką RAMPS 1.6 nie ma możliwości bezpośredniego sterowania diodami LED. Wymagane było zastosowanie dodatkowego sterownika Arduino Nano, co spowodowało wzrost kosztów konstrukcji.
- Konfiguracja algorytmów przetwarzających obraz wymaga częstych zmian oświetlenia, aby udało się dobrać najbardziej odpowiednie etapy jego pracy.
- Zastosowanie gotowej ramy zmniejszyło koszty konstrukcji maszyny, jednak posiada ona napęd śrubowy oraz jest stosunkowo ciężka, powoduje to, że prędkość poruszania się osi jest niewielka, co wydłuża czas automatycznego układania.
- Montaż manipulatora do stołu z kołami ułatwia zmianę umiejscowienia maszyny, jednak powoduje to, iż łatwiej można spowodować przesunięcie elementów ułożonych w polu roboczym, np. przez przypadkowe uderzenie w konstrukcję.
- W tym artykule została przedstawiona jedynie konfiguracja dla jednego elementu SMD, tj. kondensatora 0805. Do pełnego automatycznego ułożenia całego projektu płytki PCB należałoby wprowadzić ustawienia każdego układanego komponentu.

Konstrukcja manipulatora umożliwia automatyczne układanie elementów, jednak aby uzyskać zmniejszenie czasu pracy maszyny, można wykonać kilka dodatkowych zabiegów. Pierwszym z nich jest dodanie i skonfigurowanie drugiej głowicy. Konstrukcja mechaniczna i elementy elektroniczne manipulatora zostały do tego przystosowane, co zdecydowanie ułatwia ten proces. Kolejnym dodatkiem może być skonstruowanie automatycznych podajników elementów SMD. Kiedy są one zamontowane do manipulatora, możliwe jest podanie większej liczby elementów jednocześnie, co zmniejsza częstotliwość zmieniania pustych taśm. Sterowanie nimi odbywałoby się przez zastosowanie odpowiednich skryptów.

Wydajność manipulatora zależy zarówno od ułożenia płytek PCB na przestrzeni roboczej, jak i ułożenia podajników elementów SMD. Im większą odległość muszą pokonać głowice, tym mniejsza jest wydajność, jednak według szacunków manipulator jest w stanie ułożyć około 180–200 części na godzinę.

Literatura

- [1] Andurkar G.K., Borkar V.: *Development of Pick and Place Robot for Industrial Applications*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4, 9, 2017.
- [2] *Sneak Preview: DIY SMT Pick & Place Machine with OpenPnP*. <https://mcuoneclipse.com/2018/05/05/sneak-preview-diy-smt-pick-place-machine-with-openpnp/> [15.12.2020].
- [3] *Pick-and-Place Workflow using Stateflow for Matlab*. <https://www.mathworks.com/help/robotics/examples/pick-and-place-workflow-using-stateflow.html> [15.12.2020].
- [4] *LitePlacer standard kit*. https://www.liteplacer.com/shop20/index.php?route=product/product&product_id=64 [18.12.2020].
- [5] *The History of Industrial Robots, From Single Taskmaster to Self-Teacher*. <https://redshift.autodesk.com/history-of-industrial-robots/> [15.12.2020].
- [6] *JUKI RS-1R SMT Pick and Place Machine*. https://www.smt11.com/product/Pick-and-Place-Machine/JUKI-RS-1R-SMT-Pick-and-Place-Machine-78914.html#PRODUCT_CHARACTERISTICS [21.12.2020].
- [7] *BARR group: Introduction to Pulse Width Modulation (PWM)*. <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/PWM-Pulse-Width-Modulation> [23.12.2020].
- [8] *Coordinate System*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/User-Manual#coordinate-system> [29.12.2020].
- [9] Evans M., Noble J., Hochenbaum J.: *Arduino w akcji*. Helion, Gliwice 2014: 124–125.
- [10] *Setup and Calibration*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Setup-and-Calibration> [3.01.2021].
- [11] *Nozzle Tip Calibration Setup*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Nozzle-Tip-Calibration-Setup> [6.01.2021].
- [12] *Kondensator 0805*. http://www.sm-elektronik.pl/galerie/1/10uf-6-3v-x7r-smd-0805-kondens_5882.jpg [9.01.2021].
- [13] *Scripting*. <https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Scripting> [10.01.2021].

dr inż. KRYSTIAN SZOPA

inż. PAWEŁ KARELUS

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

kszopa@agh.edu.pl

pkarelus@student.agh.edu.pl

ANETA NAPIERAJ
ALDONA URBANEK
MAREK BOROWSKI

Future competences in mining (based on surveys, evaluations and opinions on the project Sectoral Qualifications Framework for Mining)

One of the stages of work on the Sectoral Qualifications Framework for Mining (SQFM) was to verify its initial design as a result of quantitative research using questionnaires and qualitative research through in-depth interviews (IDI). Their main goal was to identify the opinions and attitudes of respondents related to the mining industry towards the implemented SQFM project. Both people working in mining plants and in other companies and units related to the mining sector were invited to take part in the project. The expected result of the conducted research was the collection of material allowing for the verification of the provisions in terms of the needs and expectations of employers as to the qualifications of the employed employees and the assessment of the legitimacy of the proposed solutions.

In designing the research, the use of qualitative and quantitative methods was assumed. This made it possible to triangulate the data – looking at the studied research problems from different perspectives, which was to influence the obtaining of empirical material allowing for the analysis of the discussed problems taking into account various points of view. As a result, the image of the needs in the area of increasing competences and the main deficits in the mining sector has crystallized.

Key words: *competences, qualifications, Polish Qualifications Framework, Sectoral Qualifications Framework for the Mining Sector*

1. INTRODUCTION

The development of the Sectoral Qualifications Framework for the Mining (SQFM) is one of the elements of the overall work to develop and implement the Integrated Qualifications System (IQS) in Poland.

The main idea behind the IQS is an understanding of qualifications as “a set of learning outcomes in the categories of knowledge, skills and social competence, acquired in formal education, non-formal education or through informal learning, in accordance with the requirements set for a given qualification, the achievement of which is assessed through valida-

tion and formally confirmed by an authorised awarding body” [1]. It is assumed here that a qualification confirms what a person has learned regardless of the manner in which such learning has been acquired.

In order to compare different qualifications included in the Integrated Qualifications System, the Polish Qualifications Framework (PQF) was developed [2]. Because it was referenced to the European Qualifications Framework [3], it is possible to easily compare qualifications awarded in Poland to those in other European countries.

The initial pilot work conducted in 2013–2014 showed that the Polish Qualifications Framework,

which is intended as a reference point for all qualifications awarded in Poland, does not always adequately reflect the specific nature of different sectors of the economy. Therefore, work was begun on developing so-called Sectoral Qualifications Frameworks (SQF), which by adapting to the needs of a given sector, as well as by using its characteristic terminology, can provide a bridge between the world of education and the labour market [4].

SQF was created in the following sectors: sports, tourism, construction, development services, telecommunications, trade, banking, IT, public health, chemical industry, fashion industry. The first four have been included in the Integrated Qualifications System, the next three have received a positive recommendation from the IQS Stakeholder Council and are at an advanced stage of inclusion.

2. STAGES OF PREPARATION OF SQFMS

The SQFMS was created in four basic design steps. Work began with the preparation of the preliminary SQFMS project (Step 1). Building on existing legislation [5–7] and the competency analysis in the mining sector [8], the framework concept, sector determinants and contexts were developed. Then, expert consultations (Step 2) were organized in specially appointed expert teams. The next step was to conduct a survey of the opinions of employees and stakeholders of the sector (Step 3). In the last step, the final SQFMS project was developed (Step 4).

The resulting document was published, *inter alia*, on the website of the Educational Research Institute [9].

3. RESEARCH OF SECTOR OPINION ON SQFM

After the initial SQFM draft was developed, the consultation process began. For this purpose, an extensive opinion poll was conducted among employees of the sector and its other stakeholders. This chapter describes the process and results of the research.

3.1. Aim of the study and issues investigated

The main objective of this study was to identify the opinions and attitudes of mining sector stakeholders

towards the proposed SQFM being developed. People working in mining facilities as well as in other companies and entities associated with the mining sector were invited to participate in this study. Data from the study were anonymised.

The study methodology assumed conveying the project to the respondents in the form of a separate document. The expected result of the conducted study was to collect material that would allow the provisions of the proposed SQFM to be checked in terms of employers' needs and expectations regarding the qualifications of employees and to assess the validity of the proposed solutions.

The main research problems assessed were: competences, qualifications and level of knowledge of employees in the mining sector; knowledge of PQF, and SQFM in particular; the legibility of the project provisions and the effectiveness of the implementation of the SQFM provisions.

3.2. Research, methods, techniques and tools

The research design assumed the use of quantitative and qualitative methods [10–12]. This made it possible to look at the analysed research problems from different perspectives, which was to influence the obtaining of empirical material allowing for the analysis of the discussed problems taking into account various points of view.

The quantitative method was based on using the Internet survey technique. The tool used in this part of the study was an online survey placed on the www.ebadania.pl platform. The qualitative method was based on using the in-depth interview technique.

The construction of the tools was the result of discussions and consultations held among the experts. The tools were verified in a pilot study conducted on a sample of respondents with diverse socio-demographic and professional characteristics relevant to the research problem.

3.3. Selection of the study sample

The study applied a purposive sampling of the respondents. The main criterion for inclusion in the sample was employment in the mining sector. People working in various entities and institutions associated

with the mining industry were invited to take part in the quantitative research. Respondents with particularly broad and deep knowledge of the issues in question were invited to take part in the qualitative research – primarily due to the specificity of their professional duties and positions held (hereinafter referred to as experts).

3.4. Characteristics of the studied population

Part of the results of the quantitative research were prepared on the basis of responses from 105 participants on 150 questionnaires sent.

The number of years that the respondents had worked in the mining sector was quite varied (Fig. 1).

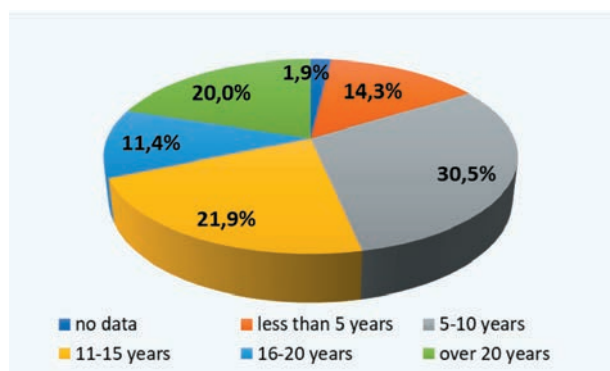


Fig. 1. Length of work in the mining sector

Less than one-third of the respondents declared that they had been working in this sector for 5 to 10 years, and every fifth respondent stated that their length of service was between 11 and 15 years; a similarly large category of respondents spoke of their experience of more than twenty years working in the

mining sector. Less numerous were the categories indicating work tenure in the industry for less than 5 years (14.3%) and 16–20 years (11.4%).

Two-thirds of the respondents were persons employed directly by a mining company (mine). Also among the respondents was a large representation of persons working in a company or entity associated with the mining industry other than a mining company (Fig. 2).

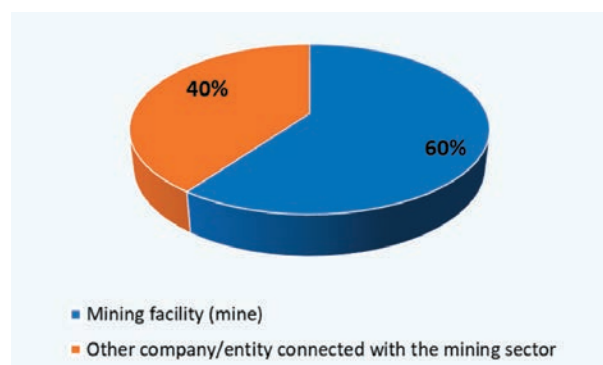


Fig. 2. Place of employment in the mining sector

Respondents were also asked about membership or work in various types of institutions associated with the mining industry. The data in Figure 3 show that almost half of the respondents declared membership or work in mining sector institutions/organisations/associations. Respondents much less frequently declared employment or membership in institutions performing supervisory and regulatory functions, activity in employers' organisations and associations, or work in universities and research institutes. The least frequent responses indicated employment or membership in entities associated with the mining sector in areas other than those indicated in the cafeteria of selections.

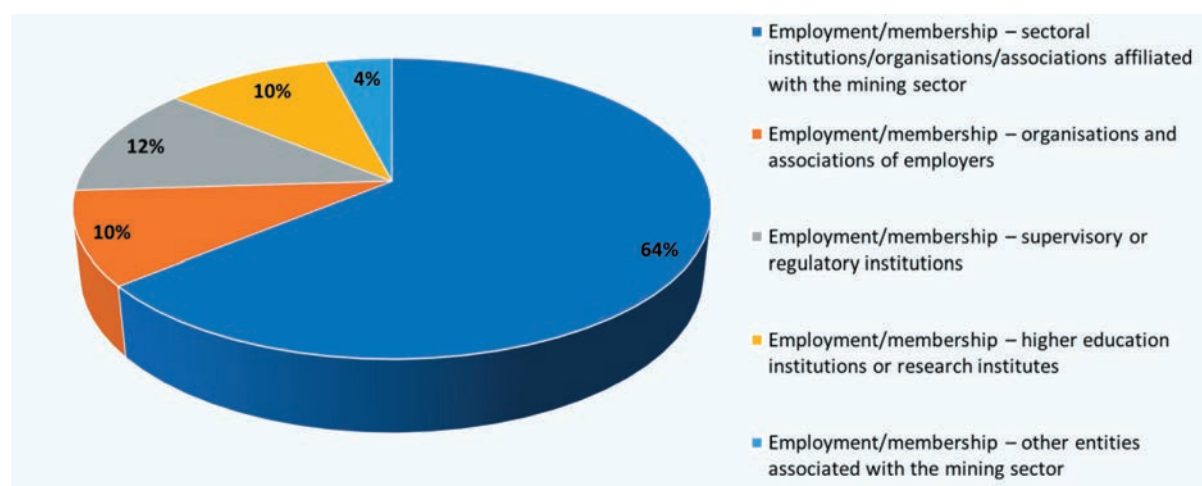


Fig. 3. Professional activity in the mining sector

A total of twenty respondents took part in the qualitative research. All those invited to the study took part in it. The group of experts included four women and sixteen men. The length of service in the mining sector declared by the respondents varied. As indicated by the data summarised in Figure 4, the most numerous were experts declaring employment in the sector for over 20 years. The respondents also included persons with relatively short work experience in the sector – less than five years.

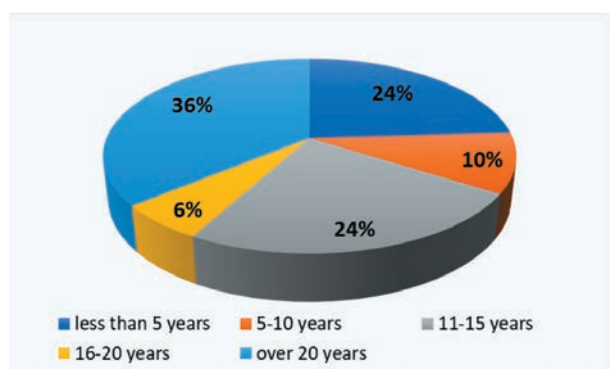


Fig. 4. Length of work in the mining sector – experts

Most of the surveyed experts were employed in companies and entities associated with the mining

sector. Figure 5 presents the declared places of employment (several experts declared simultaneous employment in both types of entities listed).

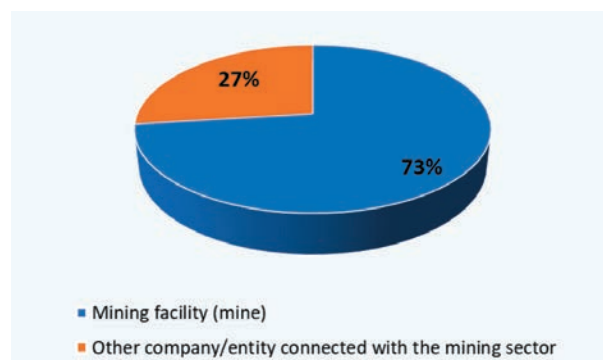


Fig. 5. Place of employment in the mining sector – experts

The experts were also asked about membership or work in various types of institutions associated with the mining industry. The data in Figure 6 indicate that the largest number of respondents declare membership or work in institutions/organisations/associations affiliated with the mining sector. None of the experts, however, declared activity in employers' organisations or associations.

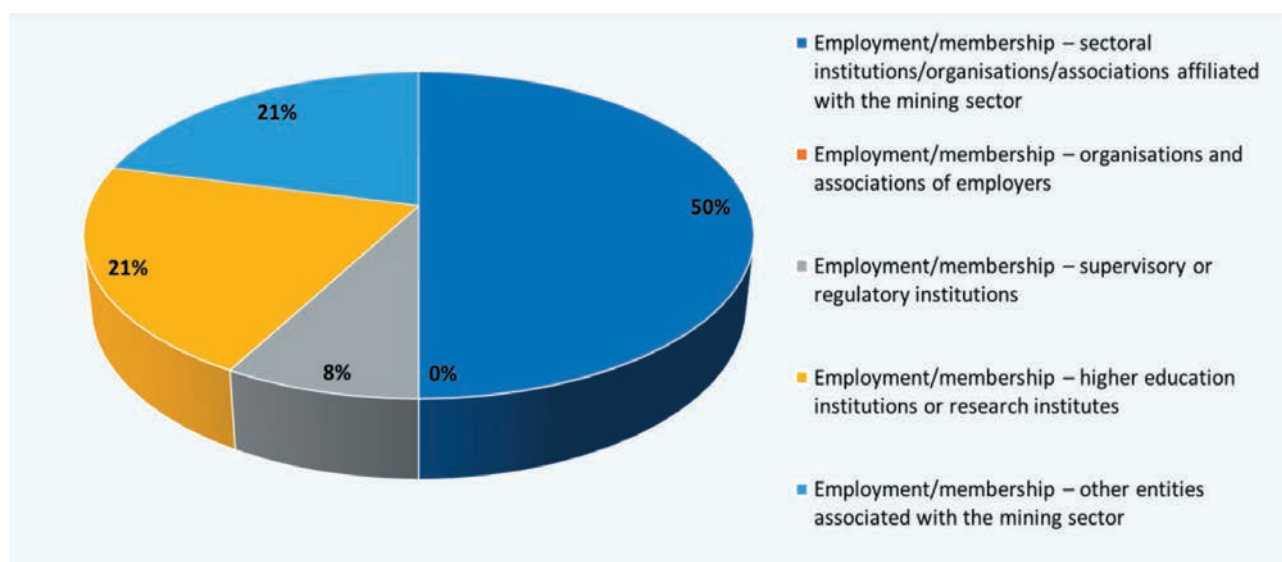


Fig. 6. Professional activity in the mining sector – experts

4. RESULTS OF THE CONSULTATIONS

The starting point for the analysis of the data collected during the empirical research was the overall assessment of the degree of familiarity with the PQF. The

data shows that only 1.9% of the respondents declared that they had no familiarity with this concept. The vast majority of respondents claimed that they are familiar with the PQF concept – having good (45.7% of responses) or very good familiarity (15.2% of responses).

A fundamental issue in the project was also the perceived need for a document regulating the qualifications framework in the mining sector. Conclusions and findings on this matter were formulated on the basis of statements from the experts invited to take part in the study. The statements of respondents indicate a commonly held belief in the legitimacy of introducing a document to regulate the qualifications framework and the justification for this.

SQFM will provide employers with a new, more accurate tool for assessing employees' knowledge, skills and qualifications and the areas that need improvement or require further employee development. Currently, this improvement or development occurs intuitively or superficially and does not fully meet its objectives. With the creation of the SQFM, the employer will be equipped with a tool, whereby he will also be able to better assess candidates for new employees, in accordance with the framework.

The document in the mining sector is an innovative solution that would allow the relevant qualifications in the industry to be systematised and new career paths, innovative training methods and technologies to be created for employees. This document would support the planning of personal development, as well as provide the opportunity to assess the value of the diplomas or certificates attained in the mining sector.

4.1. Assessment of the level of current knowledge of mining sector employees

The next issue analysed was the overall assessment of selected aspects of the qualifications of non-management employees in mining sector companies, i.e. with regard to professional knowledge, technical skills and social competences. Respondents were asked to indicate the main deficits perceived in each area too.

The data indicate high ratings for competence and knowledge in the dimensions listed. Respondents were most often of the opinion that the majority of employees in non-managerial positions in mining enterprises have a high level of competence and knowledge. Regarding the issues assessed above (professional knowledge – Fig. 7, technical skills – Fig. 8 and social competences – Fig. 9) the percentage of respondents stating that the vast majority of this group of employees – almost all or even all employees – are

well prepared to perform their professional functions exceeded 50%.

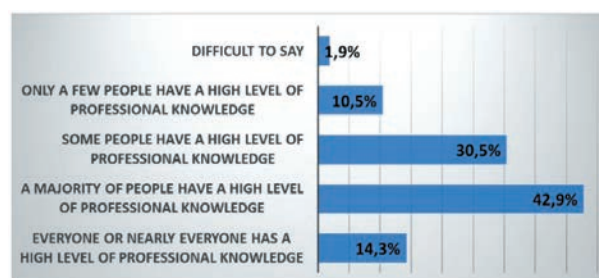


Fig. 7. The level of professional knowledge

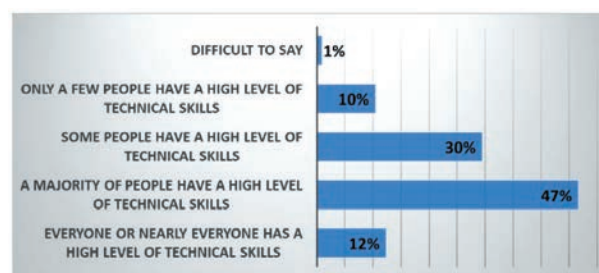


Fig. 8. The level of technical skills

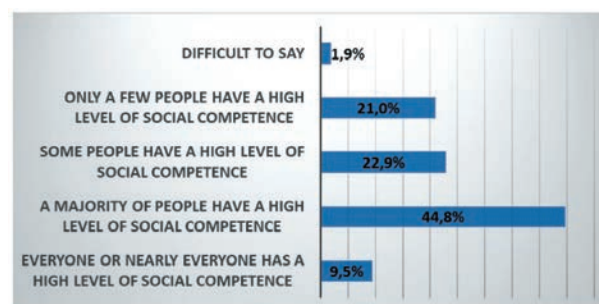


Fig. 9. The level of social competences

Assessments of the current qualifications of management staff in the mining sector are shown in Figures 10–14. The professional knowledge, technical skills, social competences, knowledge and skills in the field of organization and management as well as economics were assessed.

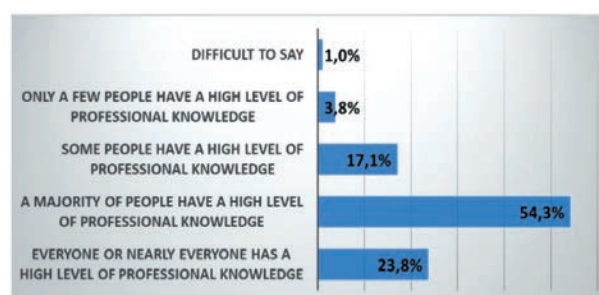


Fig. 10. The level of professional knowledge – management staff

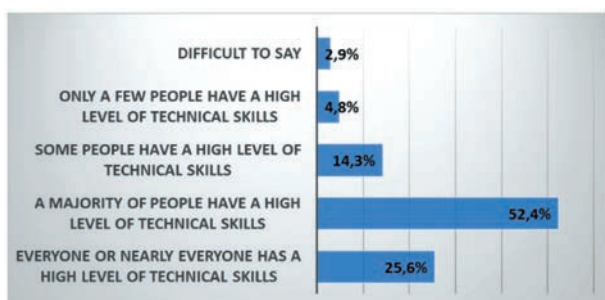


Fig. 11. The level of technical skills – management staff

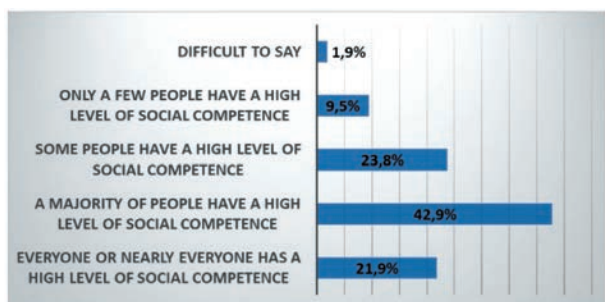


Fig. 12. The level of social competences – management staff

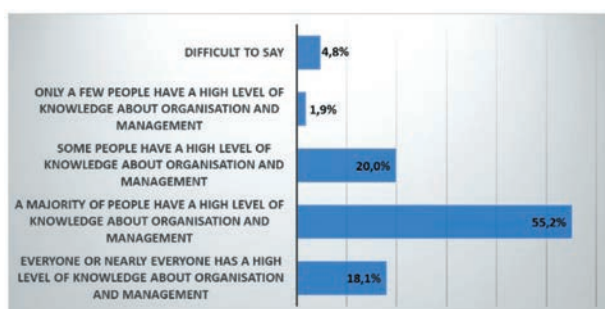


Fig. 13. The level of qualifications in the field of organization and management – management staff

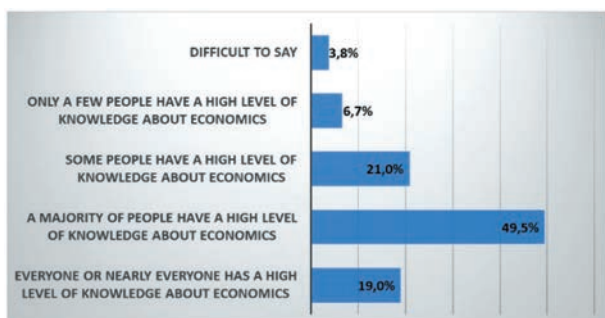


Fig. 14. The level of qualifications in the field of economic knowledge – management staff

As in the case of non-managerial employees, the conclusions from the quantitative material on the qualifications, competences and knowledge of the managerial staff in the specified areas are supplemented by

the findings from analysing the statements of experts participating in the unstructured interviews. Their comments indicate a high assessment of the analysed aspects, but at the same time, point to the existence of certain deficits – especially in the area of social competence.

4.2. Assessment of the level of knowledge of the assumptions of SQFM

The concept of the project was to provide those taking part in the empirical research with materials presenting the premises of the Sectoral Qualifications Framework for the Mining Sector (SQFM). The respondents were asked whether they were familiar with the concept before receiving the materials.

About 70% of the respondents admitted that they learned this concept when they received the documentation for evaluation. The remaining respondents declared that they knew this concept earlier. This indicates the need for a wider dissemination of the assumptions of the SRKG. The respondents were also asked to evaluate the draft document. The first issue was the general assessment of the understanding of its assumptions.

The evaluation results were high and were as follows: fully understandable – 76%, some provisions are unclear to me – 18%, only some provisions are understandable – 3%, not understandable – 3%. Almost all the respondents stated that it was prepared in an understandable way. Only one in twenty of the respondents was critical of this issue. Respondents declaring doubts as to the provisions of the draft document were asked to indicate the provisions that were problematic for them. The recorded statements indicate basically: not entirely clear qualification criteria for individual positions, the lack of precision of some provisions and fears related to the effectiveness of the implemented solutions. Respondents declaring doubts about the provisions of the draft document were asked to indicate the element that was problematic. The recorded statements indicate that the main problems concerned: not entirely clear qualification criteria for particular positions, a lack of precision of some of the provisions, and concerns about the effectiveness of the introduced solutions.

4.3. Assessment of the effectiveness of introducing SQFM

Respondents were also asked to assess the consequences of introducing the principles included in SQFM in relation to such aspects as: increasing the qualifications of employees, improving the training programme for employees, improving the education programme for those wishing to work in the mining sector, increasing the level of improvement in the comprehensiveness and completeness of qualifications, increasing the level of the effectiveness of employee recruitment, and increasing the comprehensiveness and completeness of possible career paths in mining.

The presented data (Tab. 1) indicate a positive perception of the respondents in all specified areas of the changes that could take place as a result of implementing the Sectoral Qualifications Framework for the Mining Sector. The highest rating was given to the effectiveness of introducing the planned solutions in relation to increasing the level of improvements in the education system for people who want to work in the mining sector in connection with the introduction of the principles included in the SRKG.

A significant aspect of the structure of SQFM is its potential for further application and use. According to the expert team, the framework is an important element for systematising qualifications in the mining sector.

Table 1
Assessment of the effect of introducing the principles included in SQFM

Issue	Definitely yes	Rather yes	Rather no	Definitely no	Difficult to say
Assesment of an increase in the level of employees' qualifications due to the introduction of the principles included in SQFM	46.7%	39.0%	5.7%	1.0%	7.6%
Assesment of an increase in the level of improvement of the employee training programme due to the introduction of the principles included in SQFM	49.4%	41.0%	3.8%	1.0%	4.8%
Assessment of an increase in the level of improvement of the training programme for persons seeking employment in the mining sector due to the introduction of the principles included in SQFM	50.5%	39.0%	3.8%	2.9%	3.8%
Assesment of an increase in the level of improvement of the comprehensiveness and completeness of qualifications due to the introduction of the principles included in SQFM	49.5%	36.2%	5.7%	1.0%	7.6%
Assessment of an increase in the level of the effectiveness of employee recruitment due to the introduction of the principles included in SQFM	47.6%	35.2%	8.6%	3.8%	4.8%
Assessment of an increase in the level of the comprehensiveness and completeness of the career paths available in mining due to the introduction of the principles included in SQFM	47.6%	33.3%	6.7%	3.8%	8.6%

In analysing the possibilities for using SQFM, the project team identified five main areas:

- use by training institutions (to analyse the market demand for new qualifications using the SQFM level descriptors);
- use by validation institutions and awarding bodies (to adapt training programmes to the specific needs of employers in the mining industry, using the detailed SQFM level descriptors, taking into account the specific contexts and sectoral determinants),
- use by institutions developing descriptions of qualifications,
- use by employers (to conduct employment policies and plan the employment of qualified personnel in mining companies),
- use by employees (to plan individual professional development paths).

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS RESULTING FROM THE STUDY

Whilst the concept of the Polish Qualifications Framework (PQF) is known about, it would be worth-

while to conduct activities to further popularise the solutions for employment and professional advancement in the mining sector.

No objections were raised regarding the legitimacy of implementing a document to regulate the qualifications framework. The most important benefits associated with implementing the planned solutions include a clear systematisation of qualification criteria, facilitating the determination of professional career paths, facilitating the planning and implementation of training and vocational courses, unifying the education system in Poland with European solutions, and systematising the confirmation of skills, knowledge and competences.

The assessment of the competences, knowledge and qualifications of management staff is generally positive. At the same time, however, certain deficits were noted. The most important of these is relatively weak social competence ("soft skills") and organisational and management abilities. Moreover, among the deficits indicated were such issues as: the lack of education in a relevant field, lack of experience, deficiencies in innovative thinking and acting. In particular, attention should be paid to issues relating to social competence and the organisation and management of work teams.

The SQFM entries are assessed highly as being understandable and clear, and the concept itself was viewed positively as a preliminary draft.

The influence of SQFM on optimising the employment structure, better planned training, more effective use of human resources, and improving the vocational education and training offer to meet the current needs in the mining sector were emphasised.

The SQFM is an innovative solution, which can be a tool to support the systematisation of existing qualifications relevant to the mining industry and to de-

velop new qualifications in response to social, economic, technical, technological and organisational changes.

References

- [1] Ustawa z dnia 22 grudnia 2015 roku o Zintegrowanym Systemie Kwalifikacji, Dz.U. 2016, poz. 64.
- [2] Polska Rama Kwalifikacji: <https://prk.men.gov.pl/polska-rama-kwalifikacji-prk/> [30.06.2021].
- [3] Europejskie Ramy Kwalifikacji, <https://europa.eu/europass/pl/european-qualifications-framework-efq> [30.06.2021].
- [4] Borowski M., Cała M., Augustyn A., Żurawski A., Napieraj A., Urbanek A., Bogacz P., Kuczera Z., Machniak Ł., Ratomska J.: *Sektorowa Rama Kwalifikacji dla Górnictwa (SRKG)*. Instytut Badań Edukacyjnych, Warszawa 2021.
- [5] Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze, Dz.U. z 2019 r., poz. 868.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 sierpnia 2016 r. w sprawie kwalifikacji w zakresie górnictwa i ratownictwa górniczego, Dz.U. poz. 1229.
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych, Dz.U. poz. 2293.
- [8] Instytut Badań Edukacyjnych: *Analiza kompetencji i kwalifikacji w sektorze górnictwa*. Warszawa 2021 [praca niepublikowana].
- [9] <https://bip.ibe.edu.pl/attachments/article/1779/Sektorowa%20Rama%20Kwalifikacji%20G%C3%B3rnictwa%2030.03.pdf> [20.06.2021].
- [10] Creswell J.W.: *Projektowanie badań naukowych: metody jakościowe, ilościowe i mieszane*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2013.
- [11] Grabowski H.: *Wykłady z metodologii badań empirycznych*. Oficyna Wydawnicza Impuls, Kraków 2013.
- [12] Paluchowski W.J. 2010: *Spór metodologiczny czy spór koncepcji – badania ilościowe vs jakościowe*. Roczniki Psychologiczne, t. 13, Towarzystwo Naukowe KUL, Lublin.

ANETA NAPIERAJ, Ph.D., Eng.

MAREK BOROWSKI, prof.

AGH University of Science and Technology
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
{agrodek, borowski}@agh.edu.pl

ALDONA URBANEK, Ph.D.

JSW Szkolenie i Górnictwo
ul. Węglowa 4, 44-268 Jastrzębie-Zdrój, Poland
aurbanek@jswsg.pl

ANETA NAPIERAJ
ALDONA URBANEK
MAREK BOROWSKI

Kompetencje przyszłości w górnictwie (na podstawie badań ocen i opinii dotyczących projektu Sektorowej Ramy Kwalifikacji dla Górnictwa)

Jednym z etapów prac nad Sektorową Ramą Kwalifikacji dla Górnictwa (SRKG) było dokonanie weryfikacji jej wstępnego projektu w wyniku przeprowadzenia badań ilościowych z wykorzystaniem ankiet i badań jakościowych za pośrednictwem wywiadów pogłębianych (IDI). Ich zasadniczym celem było rozpoznanie opinii i postaw respondentów związanych z branżą górniczą wobec wdrażanego projektu SRKG. Do wzięcia udziału w przedsięwzięciu zaproszono zarówno osoby pracujące w zakładach górniczych, jak i w innych firmach i jednostkach związanych z sektorem górnictwa. Oczekiwany rezultatem zrealizowanych badań było zebranie materiału pozwalającego na weryfikację zapisów pod kątem potrzeb i oczekiwań pracodawców co do kwalifikacji zatrudnianych pracowników oraz ocena zasadności proponowanych rozwiązań.

W projektowaniu badań założono wykorzystanie metod o charakterze jakościowym oraz ilościowym. Umożliwiło to triangulację danych – spojrzenie na analizowane problemy badawcze z różnych perspektyw, co wpłynęło na uzyskanie materiału empirycznego pozwalającego na analizę poruszanych problemów z uwzględnieniem zróżnicowanych punktów widzenia. W efekcie wykrystalizował się obraz potrzeb w obszarze podnoszenia kompetencji oraz głównych deficytów w sektorze górnictwa.

Słowa kluczowe: kompetencje, kwalifikacje, Polska Rama Kwalifikacji, Sektorowa Rama Kwalifikacji dla Górnictwa

1. WPROWADZENIE

Opracowanie Sektorowej Ramy Kwalifikacji dla Górnictwa (SRKG) jest jednym z elementów ogółu prac związanych z tworzeniem i wdrażaniem w Polsce Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji (ZSK).

Główną ideą stojącą za ZSK są kwalifikacje rozumiane jako „zestaw efektów uczenia się w zakresie wiedzy, umiejętności oraz kompetencji społecznych nabytych w edukacji formalnej, edukacji pozaformalnej lub przez uczenie się nieformalne, zgodnych z ustalonymi dla danej kwalifikacji wymaganiami, których osiągnięcie zostało sprawdzone w walidacji oraz formalnie potwierdzone przez uprawniony podmiot certyfikujący” [1]. Zakłada się przy tym, że kwa-

lifikacja ma potwierdzać to, czego dana osoba się nauczyła niezależnie od sposobu nauki.

W celu porównywania różnych kwalifikacji włączanych do Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji utworzono Polską Ramę Kwalifikacji [2]. Dzięki temu, że została ona odniesiona do Europejskiej Ramy Kwalifikacji [3], możliwe jest łatwe porównywanie kwalifikacji nadawanych w Polsce do kwalifikacji nadawanych w innych krajach europejskich.

Wstępne prace pilotażowe realizowane w latach 2013–2014 wykazały, że Polska Rama Kwalifikacji, z założenia mająca być punktem odniesienia dla wszystkich kwalifikacji nadawanych w Polsce, nie zawsze adekwatnie odzwierciedla specyfikę poszczególnych sektorów gospodarki. W związku z tym rozpo-

często prace nad tworzeniem tzw. sektorowych ram kwalifikacji, które w wyniku dostosowania do potrzeb danego sektora, a także wykorzystania charakterystycznego dla niego słownictwa mogą stanowić pomost między światem edukacji a rynkiem pracy [4].

SRK powstały w następujących sektorach: sportu, turystyki, budownictwa, usług rozwojowych, telekomunikacji, handlu, bankowości, IT, zdrowia publicznego, przemysłu chemicznego, przemysłu mody, motoryzacji, rolnictwa, energetyki, nieruchomości oraz górnictwa. Pierwsze cztery zostały włączone do Zintegrowanego Systemu Kwalifikacji, trzy kolejne otrzymały pozytywną rekomendację Rady Interesariuszy ZSK i są na zaawansowanym etapie włączania.

2. ETAPY PRZYGOTOWANIA SRKG

SRKG powstała w czterech podstawowych krokach projektowych. Prace rozpoczęto od przygotowania wstępnego projektu SRKG (Krok 1). Opierając się na obowiązujących przepisach prawa [5–7] oraz na analizie kompetencji w sektorze górnictwa [8], opracowano koncepcję ramy oraz wyznaczniki sektorowe i konteksty. Następnie zorganizowano konsultacje eksperckie (Krok 2) w specjalnie powołanych zespołach ekspertów. Kolejnym krokiem było wykonanie badania opinii pracowników i interesariuszy sektora (Krok 3). W kroku ostatnim opracowano finalny projekt SRKG (Krok 4).

Powstały dokument został opublikowany między innymi na stronach internetowych Instytutu Badań Edukacyjnych [9].

3. BADANIE OPINII SEKTORA NA TEMAT SRKG

Po opracowaniu wstępnego projektu SRKG przystąpiono do procesu jego konsultacji. W tym celu przeprowadzone zostało szeroko zakrojone badanie opinii wśród pracowników sektora oraz innych jego interesariuszy. W niniejszym rozdziale opisany został przebieg i rezultaty tego badania.

3.1. Cel badań i problematyka badawcza

Zasadniczym celem omawianych badań było rozpoznanie opinii i postaw interesariuszy związanych z branżą górnictwem wobec wdrażanego projektu SRKG.

Do wzięcia udziału w przedsięwzięciu zaproszono zarówno osoby pracujące w zakładach górniczych, jak też w innych firmach i jednostkach związanych z sektorem górnictwa. Badania miały charakter anonimowy.

Metodologia badań zakładała przekazanie projektu respondentom w postaci odrębnego dokumentu. Oczekiwany rezultatem zrealizowanych badań było zebranie materiału pozwalającego na weryfikację zapisów pod kątem potrzeb i oczekiwań pracodawców co do kwalifikacji zatrudnianych pracowników oraz ocena zasadności proponowanych rozwiązań.

Główne problemy badawcze, które zostały poddane ocenie, to: kompetencje, kwalifikacje i poziom wiedzy pracowników w sektorze górnictwa; znajomość PRK, a w szczególności SRKG; czytelność zapisów projektu oraz efektywność wdrożenia zapisów SRKG.

3.2. Metody, techniki i narzędzia badawcze

W projektowaniu badań założono wykorzystanie metod o charakterze ilościowym oraz jakościowym [10–12]. Umożliwiło to spojrzenie na analizowane problemy badawcze z różnych perspektyw, co miało wpłynąć na uzyskanie materiału empirycznego pozwalającego na analizę poruszanych problemów z uwzględnieniem zróżnicowanych punktów widzenia.

Metodę ilościową oparto na wykorzystaniu techniki ankiet internetowych. Jako narzędzie w tej części projektu wykorzystany został kwestionariusz ankiety online umieszczony na platformie www.ebadania.pl. Metoda jakościowa została oparta na wykorzystaniu techniki wywiadu pogłębionego.

Konstrukcja narzędzi była efektem dyskusji i konsultacji prowadzonych w gronie ekspertów. Ostateczna ich weryfikacja nastąpiła w wyniku pilotażu zrealizowanego na próbie uwzględniającej respondentów o zróżnicowanych cechach społeczno-demograficzno-zawodowych, istotnych dla problematyki badawczej.

3.3. Dobór próby badawczej

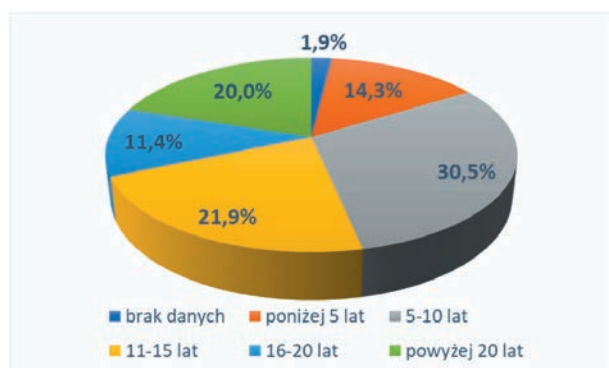
Na potrzeby badań założono celowy dobór próby badawczej. Zasadniczym kryterium włączenia do próby był fakt zatrudnienia w sektorze górnictwa. Do badań ilościowych zaproszono osoby pracujące w zróżnicowanych podmiotach i instytucjach związanych z branżą górnictwem. Do wzięcia udziału w badaniach jakościowych zaproszono respondentów dysponujących

szczególnie szeroką i głęboką wiedzą dotyczącą poruszanych zagadnień – przede wszystkim ze względu na specyfikę wykonywanych obowiązków zawodowych oraz zajmowane stanowiska (dalej nazywanych ekspertami).

3.4. Charakterystyka badanej populacji

Część wynikowa z badań ilościowych została przygotowana na podstawie odpowiedzi udzielonych przez 105 respondentów na rozesłanych 150 ankiet.

Staż pracy badanych w sektorze górniczym był dość zróżnicowany (rys. 1).

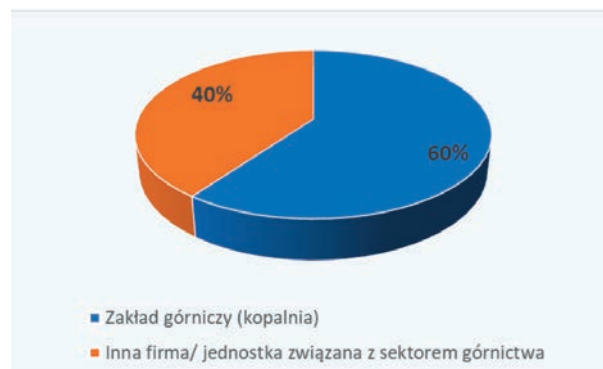


Rys. 1. Staż pracy w sektorze górniczym

Niespełna jedna trzecia respondentów zadeklarowała funkcjonowanie w tym środowisku zawodowym od 5 do 10 lat, a co piąty pytany twierdził, że jego staż pracy w tym sektorze lokuje się w granicach od 11 do 15 lat; podobnie liczna kategoria indagowanych mówiła o swoich ponad dwudziestoletnich doświadczeniach związanych z pracą w branży górniczej. Mniej liczne były kategorie wskazujących na pracę w tej

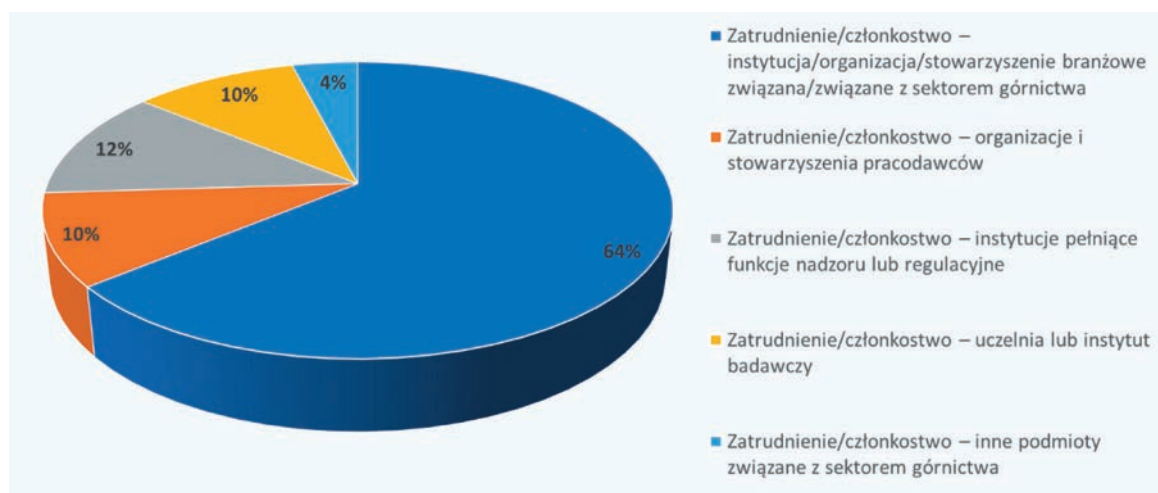
branży przez okres krótszy niż 5 lat (14,3%) oraz 16–20 lat (11,4%).

Dwie trzecie respondentów stanowiły osoby zatrudnione bezpośrednio w zakładzie górniczym (kopalni). Wśród badanych znalazła się także liczna reprezentacja osób pracujących w innej niż zakład górniczy firmie czy jednostce związanej z branżą górniczą (rys. 2).



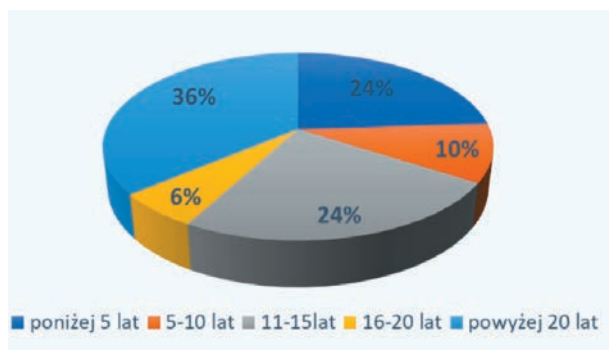
Rys. 2. Miejsce zatrudnienia w sektorze górniczym

Badanych pytano również o członkostwo bądź pracę w różnego rodzaju instytucjach związanych z branżą górniczą. Dane zawarte na rysunku 3 wskazują, że niemal połowa respondentów deklaruje przynależność lub pracę na rzecz instytucji/organizacji/stowarzyszeń branżowych związanych z sektorem górnictwa. Zdecydowanie rzadziej odpowiedzi ankietowanych wskazują na zatrudnienie bądź członkostwo w instytucjach pełniących funkcje nadzorcze i regulacyjne oraz działalność w organizacjach i stowarzyszeniach pracodawców oraz na pracę na uczelniach i w instytutach badawczych. Najrzadziej deklarowano zatrudnienie bądź członkostwo w innych niż wskazane podmiotach związanych z sektorem górnictwa.



Rys. 3. Aktywność zawodowa w sektorze górniczym

W badaniach jakościowych uczestniczyło ogółem dwudziestu respondentów. Wszyscy zaproszeni do badania wzięli w nim udział. W gronie ekspertów znalazły się cztery kobiety oraz szesnastu mężczyzn. Staż pracy w sektorze górnictwa deklarowany przez badanych był zróżnicowany. Jak wskazują dane przedstawione na rysunku 4, najliczniej reprezentowani byli eksperci deklarujący zatrudnienie w sektorze powyżej 20 lat. W gronie badanych znalazły się również osoby legitymujące się względnie krótkim stażem – poniżej pięciu lat.



Rys. 4. Staż pracy w sektorze górnictwym – eksperci

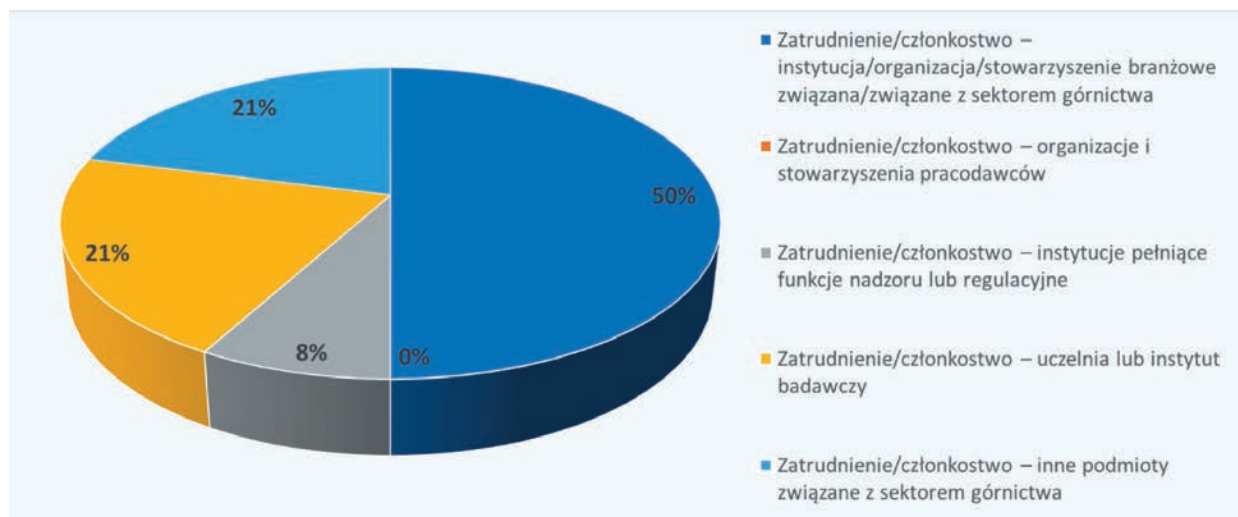
Większość badanych ekspertów stanowiły osoby zatrudnione w firmach i jednostkach związanych z sek-

torem górnictwa. Rysunek 5 przedstawia deklaracje dotyczące zatrudnienia (kilku ekspertów zadeklarowało jednocześnie zatrudnienie w obu wyszczególnionych typach podmiotów).



Rys. 5. Miejsce zatrudnienia w sektorze górnictwym – eksperci

Ekspertów pytano również o członkostwo bądź pracę w różnego rodzaju instytucjach związanych z branżą górnictwą. Dane wskazują, że największa liczba badanych deklaruje przynależność lub pracę na rzecz instytucji/ organizacji/ stowarzyszeń branżowych związanych z sektorem górnictwa. Żaden z ekspertów nie zadeklarował natomiast działalności w organizacjach i stowarzyszeniach pracodawców (rys. 6).



Rys. 6. Aktywność zawodowa w sektorze górnictwym – eksperci

4. WYNIKI KONSULTACJI

Punktem wyjścia analizy danych zgromadzonych w czasie badań empirycznych stała się ogólna ocena stopnia znajomości PRK. Dane wskazują, że zaledwie 2% respondentów deklaruje, że nie zna tej koncepcji. Zdecydowana większość badanych twierdzi, że idea

PRK jest im znana – dobrze (45,7% wskazań) lub bardzo dobrze (15,2% wskazań).

Fundamentalną kwestią dla realizowanego przedsięwzięcia była także sprawa postrzegania potrzeby stworzenia dokumentu regulującego ramy kwalifikacji w sektorze górnictwym. Wnioski i ustalenia w tym zakresie sformułowano na podstawie wypowiedzi

ekspertów zaproszonych do wzięcia udziału w badaniu. Wypowiedzi respondentów z tej grupy wskazują na powszechnie panujące przekonanie o zasadności wdrożenia dokumentu regulującego ramy kwalifikacji oraz uzasadnienia akceptującej postawy.

SKRG pozwoli na wyposażenie pracodawcy w nowe, dokładniejsze narzędzie do oceny pracownika pod kątem posiadanej wiedzy, umiejętności i kwalifikacji oraz obszarów, które wymagają poprawy lub w których warto rozwijać pracownika. Obecnie wspomniana poprawa lub rozwój prowadzone są intuicyjnie lub powierzchownie i nie do końca spełniają tym swoje założenia. Dzięki utworzeniu SRKG pracodawca zostanie wyposażony w narzędzie, za pomocą którego będzie mógł także lepiej ocenić kandydatów na nowych pracowników, zgodnie z ramą.

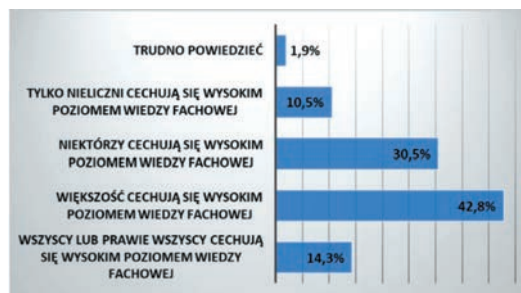
Dokument w sektorze górnictwa jest innowacyjnym rozwiązaniem, które pozwoliłoby uporządkować kwalifikacje istotne dla tej branży oraz stworzyć nowe ścieżki kariery zawodowej, innowacyjne metody i technologie kształcenia dla pracowników. Dokument ten byłby wsparciem w planowaniu osobistego rozwoju, dałby możliwość oceny, ile warte są zdobywane dyplomy czy certyfikaty w sektorze górnictwa.

4.1. Ocena poziomu obecnej wiedzy pracowników w sektorze górnictwa

Kolejnym analizowanym zagadnieniem była ogólna ocena kwalifikacji pracowników niepełniących funkcji kierowniczych w przedsiębiorstwach sektora górnictwa w wybranych aspektach, tj. w odniesieniu do wiedzy fachowej, umiejętności technicznych i kompetencji społecznych. Respondentów poproszono również o wymienienie głównych deficytów we wskazanych zakresach.

Zaprezentowane dane świadczą o wysokich ocenach kompetencji i wiedzy w wyszczególnionych wymiarach. Najliczniejsze kategorie w odniesieniu do wszystkich podanych aspektów stanowili respondenci formułujący opinie, według których większość pracowników niepełniących funkcji kierowniczych w przedsiębiorstwach sektora górnictwa cechuje się wysokim poziomem kompetencji i wiedzy. W odniesieniu do powyżej ocenianych kwestii (wiedza fachowa – rys. 7, umiejętności techniczne – rys. 8 i kompetencje społeczne – rys. 9) w tej grupie pracowników odsetki respondentów twierdzących, że zdecydowana więk-

szość, prawie wszyscy lub wręcz wszyscy zatrudnieni są dobrze przygotowani do pełnienia realizowanych funkcji zawodowych, przekraczały poziom 50%.



Rys. 7. Poziom wiedzy fachowej

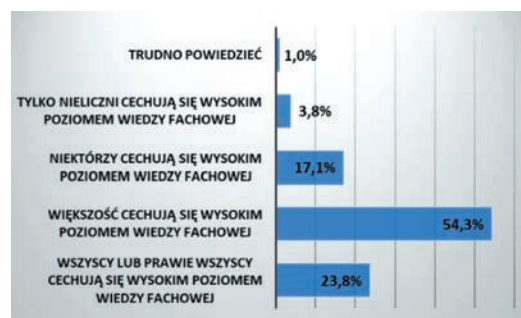


Rys. 8. Poziom umiejętności technicznych

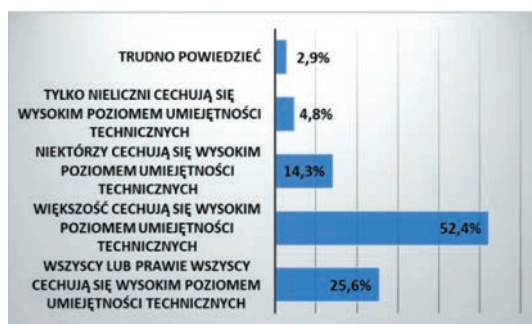


Rys. 9. Poziom kompetencji społecznych

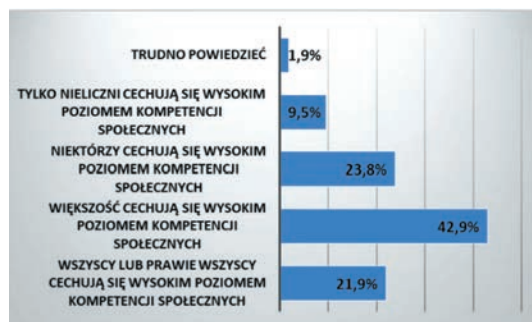
Oceny obecnych kwalifikacji kadry zarządzającej w sektorze górnictwa przedstawiono na rysunkach 10–14. Ocenie poddano wiedzę fachową, umiejętności techniczne, kompetencje społeczne, wiedzę i umiejętności z zakresu organizacji i zarządzania, a także ekonomii.



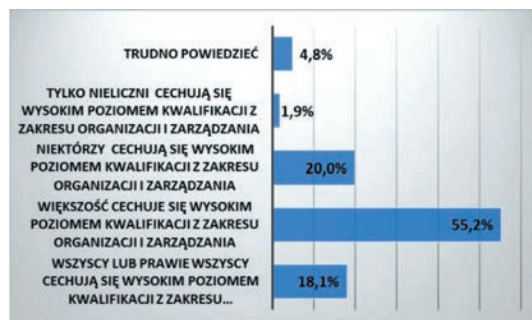
Rys. 10. Poziom wiedzy fachowej



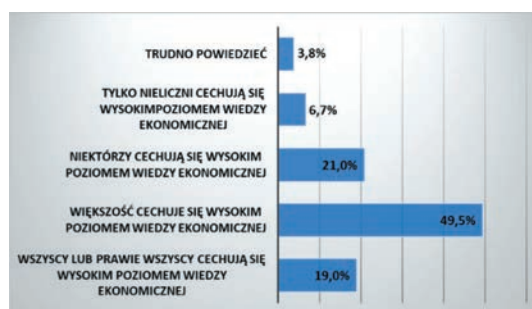
Rys. 11. Poziom umiejętności technicznych



Rys. 12. Poziom kompetencji społecznych



Rys. 13. Poziom kwalifikacji z zakresu organizacji i zarządzania



Rys. 14. Poziom kwalifikacji z zakresu wiedzy ekonomicznej

Analogicznie jak w przypadku pracowników niepełniących funkcji kierowniczych uzupełnieniem wniosków opartych na materiale ilościowym dotyczącym kwalifikacji, kompetencji i wiedzy kadry zarządzającej w wyszczególnionych obszarach, są ustalenia

pochodzące z analizy wypowiedzi ekspertów biorących udział w wywiadach swobodnych. Ich głosy wskazują na wysoką ocenę analizowanych aspektów. Jednocześnie jednak pojawiają się wskazania istnienia pewnych deficytów – szczególnie w obszarze kompetencji społecznych pracowników.

4.2. Ocena poziomu znajomości założeń SRKG

Koncepcja projektu zakładała dostarczenie osobom biorącym udział w badaniach empirycznych materiałów prezentujących założenia SRKG. Zapytano respondentów, czy samo to pojęcie było im znane, nim zostały im przekazane materiały.

Około 70% badanych przyznało, że poznało to pojęcie w momencie otrzymania dokumentacji do oceny. Pozostali respondenci zadeklarowali jego wcześniejszą znajomość. Wskazuje to na konieczność szerszego rozpropagowania założeń SRKG. Badanych poproszono także o ocenę projektowanego dokumentu. Pierwszą kwestią stała się ogólna ocena poziomu rozumienia jego założeń.

Wyniki oceny były wysokie i kształtowały się następująco: zrozumiała w całości – 76%, pewne zapisy są dla mnie niejasne – 18%, zrozumiałe są tylko niektóre zapisy – 3%, niezrozumiała – 3%. Niemal wszyscy pytani stwierdzili, że został on przygotowany w sposób zrozumiały. Zaledwie jedna dwudziesta spośród badanych osób krytycznie odniosła się do tej kwestii. Respondenci deklarujący wątpliwości co do zapisów projektowanego dokumentu zostali poproszeni o wskazanie problematycznych dla nich zapisów. Odnotowane wypowiedzi wskazują zasadniczo na nie do końca jasne kryteria kwalifikacji na poszczególne stanowiska, brak precyzji niektórych zapisów oraz obawy związane z efektywnością wprowadzanych rozwiązań.

4.3. Ocena efektywności wprowadzenia SRKG

Badani zostali także poproszeni o ocenę konsekwencji wprowadzenia zasad ujętych w SRKG w odniesieniu do takich aspektów, jak: wzrost kwalifikacji pracowników, udoskonalanie programu szkoleń pracowników, udoskonalanie programu kształcenia osób chcących podjąć pracę w sektorze górniczym, wzrost poziomu udoskonalania kompleksowości i kompletności kwalifikacji, wzrost poziomu efektywności rekrutacji pracowników oraz wzrost kompleksowości i kompletności ścieżek kariery możliwych w górnictwie.

Zaprezentowane wyniki (tab. 1) wskazują na pozytywne postrzeganie zmian związanych z wdrożeniem Sektorowej Ramy Kwalifikacji dla sektora górnictwa przez respondentów we wszystkich wyszczególnionych płaszczyznach. Najwyżej oceniono efektywność wprowadzenia planowanych rozwiązań w odniesieniu do wzrostu poziomu udoskonalania

systemu kształcenia osób chcących podjąć pracę w sektorze górnictwym w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG.

Istotnym aspektem budowy SRKG są możliwości jej dalszego stosowania i wykorzystania. Zdaniem zespołu eksperckiego rama jest istotnym elementem porządkowania kwalifikacji w sektorze górnictwa.

Tabela 1
Ocena efektywności wprowadzenia SRKG

Wyszczególnienie	Zdecydowanie tak	Raczej tak	Raczej nie	Zdecydowanie nie	Trudno powiedzieć
Ocena wzrostu poziomu kwalifikacji pracowników w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	46,7%	39,0%	5,7%	1,0%	7,6%
Ocena wzrostu poziomu udoskonalania programu szkoleń pracowników w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	49,4%	41,0%	3,8%	1,0%	4,8%
Ocena wzrostu poziomu udoskonalania systemu kształcenia osób chcących podjąć pracę w sektorze górnictwym w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	50,5%	39,0%	3,8%	2,9%	3,8%
Ocena wzrostu poziomu udoskonalania kompleksowości i kompletności kwalifikacji w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	49,5%	36,2%	5,7%	1,0%	7,6%
Ocena wzrostu poziomu efektywności rekrutacji pracowników w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	47,6%	35,2%	8,6%	3,8%	4,8%
Ocena wzrostu kompleksowości i kompletności ścieżek kariery możliwych w górnictwie w związku z wprowadzeniem zasad ujętych w SRKG	47,6%	33,3%	6,7%	3,8%	8,6%

Zespół realizujący projekt wyodrębnił pięć podstawowych płaszczyzn zastosowań SRKG:

- wykorzystanie przez instytucje szkoleniowe (przebieganie analiz zapotrzebowania rynku na nowe kwalifikacje z wykorzystaniem charakterystyk poziomów SRKG),
- wykorzystanie przez instytucje walidujące i certyfikujące (dostosowywanie programów szkoleń do specyficznych potrzeb pracodawców w górnictwie, z wykorzystaniem szczegółowych charakterystyk poziomów SRG, z uwzględnieniem poszczególnych kontekstów i wyznaczników sektorowych),
- wykorzystanie przez instytucje tworzące opisy kwalifikacji,
- wykorzystanie przez pracodawców (prowadzenie polityki zatrudniania i planowania zatrudniania wykwalifikowanych kadr w przedsiębiorstwach górniczych),
- wykorzystanie przez pracowników (planowanie indywidualnego rozwoju zawodowego przez pracowników).

5. WNIOSKI I REKOMENDACJE WYNIKAJĄCE Z BADANIA

Koncepcja Polskiej Ramy Kwalifikacji (PRK) jest znana, niemniej jednak warto prowadzić działania zmierzające do dalszej popularyzacji tego modelu rozwiązań dotyczących zatrudnienia i awansu zawodowego w branży górniczej.

Zasadność wdrożenia dokumentu regulującego ramy kwalifikacji nie budzi zastrzeżeń. Najważniejsze korzyści, jakie wiążą się z wdrożeniem planowanych rozwiązań to między innymi jednoznaczne uporządkowanie kryteriów kwalifikacji, ułatwienie w zakresie planowania ścieżek kariery zawodowej, ułatwienie w zakresie planowania i realizacji szkoleń i kursów zawodowych, ujednolicenie systemu kształcenia w Polsce z rozwiązaniami europejskimi, uporządkowanie potwierdzeń posiadanych umiejętności, wiedzy i kompetencji.

Ocena kompetencji, wiedzy i kwalifikacji pracowników niepełniących funkcji kierowniczych, a także

kadry zarządzającej jest zasadniczo pozytywna. Jednocześnie jednak ujawniły się pewne deficyty. Najistotniejszym z nich są stosunkowo słabe kompetencje społeczne („umiejętności miękkie”). Ponadto wśród wskazywanych deficytów pojawiały się takie kwestie, jak: braki w wykształceniu, brak doświadczenia praktycznego, brak odpowiedzialności za powierzony sprzęt, brak chęci do rozwoju zawodowego, brak innowacyjności w myśleniu i działaniu. W szczególności uwagę należy poświęcić zagadnieniom z zakresu kompetencji społecznych oraz organizacji i zarządzania zespołami pracowniczymi.

Zapisy SRKG oceniane są jako w wysokim stopniu zrozumiałe i klarowne, a sama koncepcja postrzegana była pozytywnie już na etapie projektu wstępnego.

Podkreślano wpływ SRKG na optymalizację struktury zatrudnienia, lepsze planowanie szkoleń, bardziej efektywne wykorzystanie zasobów kadrowych, ulepszenie oferty kształcenia i szkolenia zawodowego odpowiadającej obecnym potrzebom w górnictwie.

SRKG jest innowacyjnym rozwiązaniem, które może stanowić narzędzie wspierające uporządkowanie istniejących kwalifikacji istotnych dla branży górniczej oraz stworzyć nowe kwalifikacje będące odpowiedzią na zmiany społeczne, gospodarcze, techniczne, technologiczne oraz organizacyjne.

Literatura

- [1] Ustawa z dnia 22 grudnia 2015 roku o Zintegrowanym Systemie Kwalifikacji, Dz.U. 2016, poz. 64.
- [2] Polska Rama Kwalifikacji: <https://prk.men.gov.pl/polska-rama-kwalifikacji-prk/> [30.06.2021].

- [3] Europejskie Ramy Kwalifikacji, <https://europa.eu/europass/pl/european-qualifications-framework-eqf> [30.06.2021].
- [4] Borowski M., Cała M., Augustyn A., Żurawski A., Napieraj A., Urbanek A., Bogacz P., Kuczera Z., Machniak Ł., Ratomska J.: *Sektorowa Rama Kwalifikacji dla Górnictwa (SRKG)*. Instytut Badań Edukacyjnych, Warszawa 2021.
- [5] Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze, Dz.U. z 2019 r., poz. 868.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 2 sierpnia 2016 r. w sprawie kwalifikacji w zakresie górnictwa i ratownictwa górniczego, Dz.U. poz. 1229.
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych, Dz.U. poz. 2293.
- [8] Instytut Badań Edukacyjnych: *Analiza kompetencji i kwalifikacji w sektorze górnictwa*. Warszawa 2021 [praca niepublikowana].
- [9] <https://bip.ibe.edu.pl/attachments/article/1779/Sektorowa%20Rama%20Kwalifikacji%20G%C3%B3rnictwa%2030.03.pdf> [20.06.2021].
- [10] Creswell J.W.: *Projektowanie badań naukowych: metody jakościowe, ilościowe i mieszane*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2013.
- [11] Grabowski H.: *Wykłady z metodologii badań empirycznych*. Oficyna Wydawnicza Impuls, Kraków 2013.
- [12] Pałuchowski W.J.: *Spór metodologiczny czy spór koncepcji – badania ilościowe vs jakościowe*. Roczniki Psychologiczne, t. 13, Towarzystwo Naukowe KUL, Lublin 2010.

dr inż. ANETA NAPIERAJ
dr hab. inż. MAREK BOROWSKI, prof. AGH
AGH Akademia Górnicza-Hutnicza
im. Stanisława Staszica
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
{agrodek, borowski}@agh.edu.pl

dr ALDONA URBANEK
JSW Szkolenie i Górnictwo
ul. Węglowa 4, 44-268 Jastrzębie-Zdrój
aurbanek@jswsig.pl

BARTOSZ GÓRALCZYK
WOJCIECH HORAK

Design of a machine for trenchless pipe replacement using the static cracking method

Efforts to minimize surface disturbances during earthworks are an important aspect of modern civil engineering. These expectations are met by a number of technologies that make it possible to carry out such works using trenchless technologies. The static cracking method makes it possible to extend, modernize or renovate the existing underground infrastructure. The paper presents the design of a device assigned for trenchless pipe replacement using the static cracking method. The developed device is characterized by the use of a new type of drive system with the use of articulated rods. In addition, the work proposes ways to solve the main issues in the design of this type of device.

Key words: *machine design, cracking, pipeline replacement, trenchless methods*

1. INTRODUCTION

For many years, the use of excavation methods, i.e. methods that involve digging a trench along the entire length of the conducted earthworks, has been a natural and popular method for the replacement and installation of underground infrastructures. However, the use of these methods is associated with a long duration of work and significant costs that increase with the depth and length of excavation. The effort to minimize the size of excavations has many positive ecological, economic, and legal aspects [1].

The expansion of urban agglomerations, dynamic development of transport infrastructure and growing requirements concerning the interference of earthworks with the surroundings make it necessary to search for alternative methods and technologies of conducting earthworks in relation to excavation. For this reason, trenchless methods have developed significantly in recent years as a cheaper and faster method of performing such works. A significant advantage of trenchless technologies is the relatively low impact on the environment and the direct surroundings of the worksite.

There are a number of different trenchless methods, such as microtunneling, hydraulic pipe jacking, cracking, and repair with resin agents [2]. The technologies of pipe replacement by trenchless methods can be divided into technologies with leaving the old pipe in the ground or removing it. The first of these is the subject of this paper and is known as Pipe Cracking and Pipe Bursting. The cracking method is used whenever the purpose of the work is to increase the diameter of the repaired duct and during the replacement it should be increased. Another way of renovating pipelines is repair with resin agents, which, however, results in significant reductions in the inner diameter of the replaced pipes [3].

The paper presents a proposal for the modernization of a device for trenchless pipe replacement by static cracking.

2. THE PIPE CRACKING METHOD

The cracking method involves the renovation of pipelines through the destruction of the old ones by crushing, tearing or cutting, and laying new sections of pipes in place of the old ones.

Implementation of the method begins digging a starting and ending chamber between which the section of the pipeline requiring replacement is located (Fig. 1). The next step is to insert a rod or rope into the old duct, which is used to pull the cutting head. Next, the cutting head is pulled into the old duct together with a new duct of a given diameter, creating

a new channel. The head should have a diameter at least 10% larger than the diameter of the new hose. This avoids problems with the new conduit getting stuck in the soil. Additionally, the hole should not be made too large due to the possibility of soil collapse at the ground surface [4]. Debris from the old conduit after destruction remains in the soil.

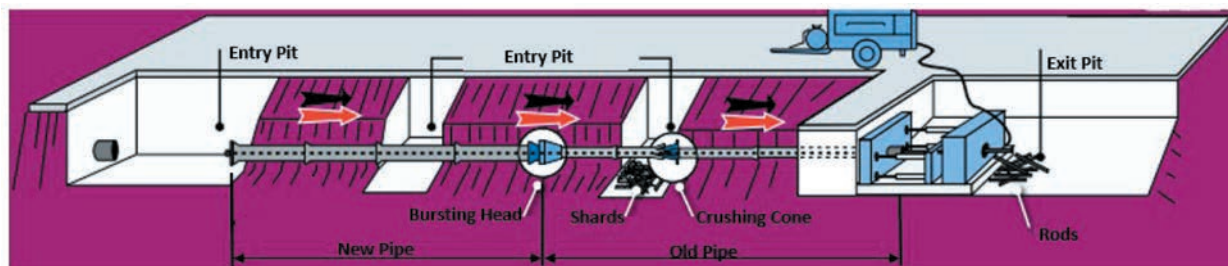


Fig. 1. Schematic of a static cracking system [5]

3. DESIGN ASSUMPTIONS

It was assumed that the maximum diameter of the new pipe is 450 mm, and the minimum diameter of the pipe to be replaced is 400 mm. The relationship between the diameters of new and replacement pipes is shown in Table 1. The green color indicates the ranges of the machine with the currently used rods, the red color indicates that the main unit meets the power reserve, while the rods are too wide. Black in-

dicates the general relation of enlarging the diameters of already existing ducts [2].

The maximum length of the replaced pipeline for the cracking method is 120 meters [2]. Considering the classic case of a machine performing pipe replacement by the cracking method, the length of the replaced pipe was assumed to be $l = 80$ m.

The machine pulls the heads to preclude the occurrence of compressive stresses and exposure of the drive systems components to buckling. The rods are tensioned only.

Table 1
Possibilities of increasing diameters

New pipe diameter [mm]	Diameter of pipe to be replaced [mm]															
	50	75	100	125	150	200	225	250	300	350	375	400	450	500	525	600
63	●															
90	●	●					●									
110	●	●	●				●									
125	●	●	●				● ● ●									
180		●	●	●	●											
200			●	●	●											
225			●	●	●	●										
250			●	●	●	●	●									
280				●	●	●	●	●								
315					●	●	●	●	●							
355					●	●	●	●	●	●						
400							●	●	●	●	●					
450							●	●	●	●	●	●				
500							●	●	●	●	●	●	●			
560									●	●	●	●	●	●	●	
630										●	●	●	●	●	●	●

4. DEVICE DESIGN

4.1. Required manpower

Based on the empirical equation (1) [6], the required pulling force of the pipe bursting head was determined:

$$F = \frac{\pi \cdot g \cdot (D^2 - d^2)}{4800} \text{ [kN]} \quad (1)$$

where:

- g – acceleration of gravity ($g = 9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),
- D – diameter of the new pipe increased by 20% ($D = 540 \text{ mm}$),
- d – diameter of the pipe to be renovated ($d = 400 \text{ mm}$),
- 4800 – empirical scaling factor.

Assuming the upper values of diameters, adopted in the design assumptions, the maximum working force is 845 kN. In order to ensure a surplus of the working force, the value for the designed machine of 1 MN was assumed for further calculations.

4.2. The rod design

Among the main components of the designed system, with a significant impact on the structure and operation of the device, are the rods. Their role is to ensure the transmission of the operating force, and their design determines how the force is transferred from the hydraulic system to the cutting-crushing head. In this project, two concepts of rod design were considered.

Cylindrical threaded rods

A common approach is to use rods with threaded ends (Fig. 2).



Fig. 2. Threaded rod

To drive this type of rod, an expanding and clamping jaw system is used (Fig. 3). This connection transmits force only one way, while the other way provides free return of the actuator. This solution is characterized by very good mechanical strength. The main

disadvantage of this method is the necessity to twist/untwist the rods in the excavation while inserting and removing the rods from the machine. This is due to the lack of flexible connections between the rods to allow angular movement between them.

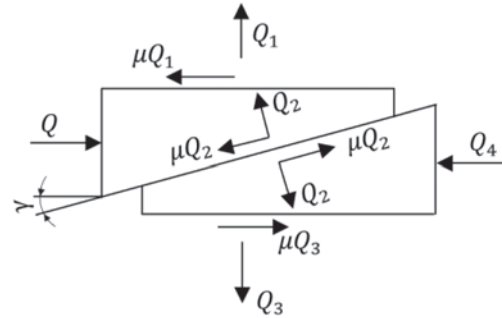


Fig. 3. Principle of operation of an expansion-clamp connection [7]

Articulated rods

To overcome the inconvenience of using the twisted rods, a new rod design is proposed in this paper (Fig. 4). The poles are connected by means of articulated joints. In this way, the flexibility of the rod set is increased and it is possible to connect and pull them out of the trench. The articulated connection also prevents bending stresses from occurring at the rod connection point. The discussed design variant is based on a pin connection.

The design of the rod necessitates a change in the method of force transmission from the friction (expansion-clamp) method to the shape method. The element that fulfils the task of power transmission is a linear pawl with an appropriate geometry. In order to implement the pawl-rod coupling, holes were made in the cylindrical part of the rod cooperating with the pawl.



Fig. 4. Design of the proposed articulated rod

For the adopted design assumptions and estimated loads of the working system, strength calculations of the rods were carried out. The calculations show that the highest stress in the rod is 312.5 MPa, while the highest surface pressure occurs in the forks and amounts to 81.2 MPa. The obtained stress values in-

indicate that it is possible to make the rods with the use of most steels with high strength properties and good weldability. Weldability is important due to the way these elements are shaped.

4.3. The linear pawl design

The geometry of the designed linear pawl is shown in Figure 5. This element is designed to transmit the force from the hydraulic system that pulls the rods and then allows the cylinders to return to their initial position relative to the stationary rods.



Fig. 5. The linear pawl

The designed pawl was subjected to FEM strength analysis. The highest stresses occur in the area marked in red in Figure 6. The maximum reduced stresses according to the H-M-H hypothesis amount to nearly 445 MPa and occur as local concentrations. The pawl stiffness is satisfactory, with the maximum deformation less than 2 mm.

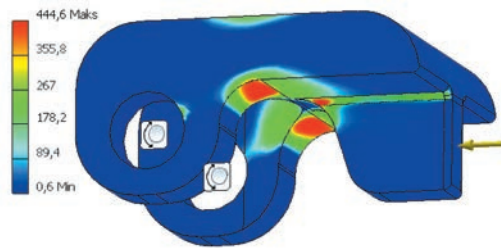


Fig. 6. Results of linear pawl FEA analysis

4.4. Calculations of pawl pins

The pin in the pawl is fixed on one side in a bushing of thickness g . This seating is due to the rods passing through the pawl, which makes it impossible to support the pin on both sides.

Figure 7 shows a cross-section of the pawl assembly, the pin (1) transfers the force between the linear pawl (4) and the actuator (2), the cover (5) protects

the pin from slipping out, and the pawl tooth (4'') allows the rods to move. The pawl cover is marked with a number (3).

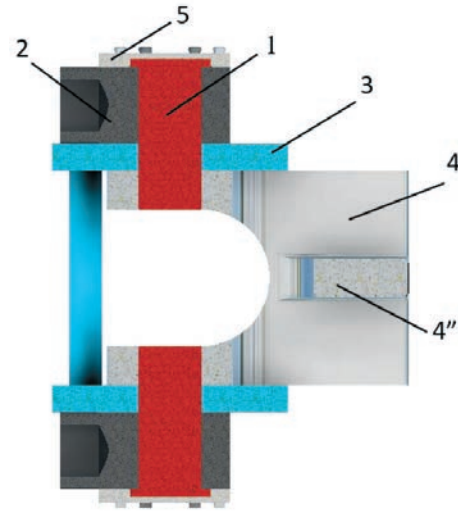


Fig. 7. The pawl assembly

The one-sided restraint of the pin (see Fig. 7, pos. 1) is unfavorable because bending of the pin occurs during subsequent operating cycles. Due to the nature of the loading, verifying fatigue calculations of the pin are required to verify the durability and reliability of the arrangement.

To check the value of the safety factor δ , the Soderberg formula [8] was used:

$$\delta = \frac{Z_{gj}}{\frac{\beta \cdot \sigma_a}{\varepsilon} + Z_{gj} \cdot \frac{\sigma_m}{R_{eg}}} \quad (2)$$

where:

- R_{eg} – bending yield strength [MPa],
- Z_{gj} – single-sided bending fatigue limit [MPa],
- β – stress concentration factor [–],
- ε – size factor [–],
- σ_a – stress amplitude [MPa],
- σ_m – average stress [MPa].

In addition, calculations were performed to verify the value of surface stresses in the pin-actuator sleeve and pin-pawl connections.

Due to the unilateral attachment of the pins in the rod, the total surface pressure in the connection is the sum of the pressure resulting from the force in the direction normal to the working surface of the pin and the pair of forces balancing the bending moment. The load model adopted corresponds to the scheme shown in Figure 8.

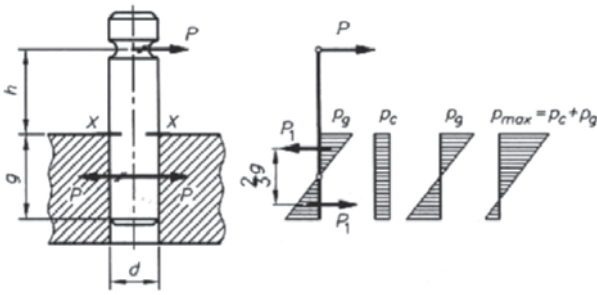


Fig. 8. Simplified model of the pin load [7]

The value of the maximum surface pressures in the pin-actuator sleeve connection is expressed as [9]:

$$p_{\max 1} = \frac{P \left(6 \frac{h}{g_1} + 4 \right)}{g_1 d} \quad (3)$$

while the stresses in the pin-pawl joint:

$$p_{\max 2} = \frac{P}{g_2 d} \quad (4)$$

where:

- h – distance from where the force is applied to the surface [mm],
- g_1 – the depth of the pin insertion into the tight-fitting cylinder sleeve [mm],
- g_2 – depth of the pin insertion in a loosely fitted pawl [mm],
- P – force acting on the pin [kN],
- d – pin diameter [mm].

Based on eq. (2), the value of the safety factor in the most loaded cross-section was determined ($\delta = 1.29$). In addition, from eqs. (3) and (4), the values of surface pressures were obtained as $p_{\max 1} = 227.5$ MPa and $p_{\max 2} = 59.6$ MPa.

The obtained value of the fatigue safety factor ensures the proper functioning of the joint. However, the surface pressure results indicate that additional bushing of the pin holes in the cylinder sleeve using high-grade, tempered steel bushings may be necessary.

4.5. The modular expansion pin

The limited space between the rods and the pawl restricts the size of the rod connection pin. Therefore, it is not possible to use a typical headed pin or a pin protected against axial displacement by means of a locking pin. The concept of pin embedding using a push-in connection must also be rejected for operational reasons, due to the long pressing pin in and the

wear of elements during frequent connecting and disconnecting.

For the discussed system, a conceptual design of the expanding pin (Fig. 9) connecting the rods was developed, in which the above-mentioned problems were eliminated. The expansion pin consists of a tapered axle (1) with a hole cut out, which is fixed in the eye and fork first.

The tapered bushing (2) is inserted, followed by the tapered head bolt (3) and the tapered head pin ending in a threaded hole (4). The screw and the pin are screwed together to press against the surface and prevent the expansion pin from moving.

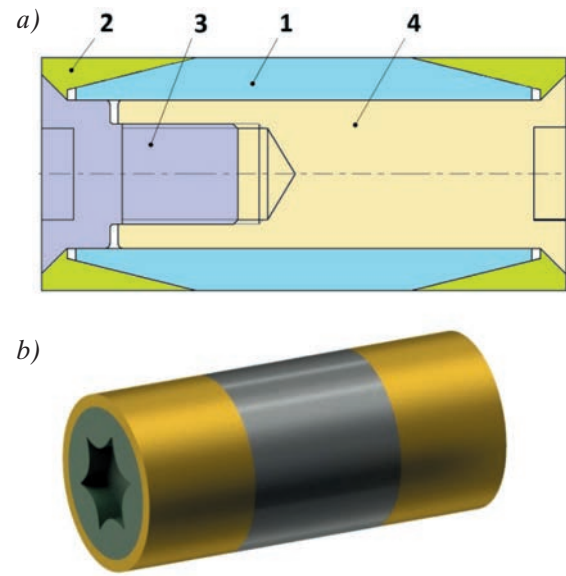


Fig. 9. Expansion pin: a) cross-section; b) view

4.6. The device frame

The frame (Figs. 10 and 11) is welded from square tubes (120×120×8). To improve the rigidity of the frame, four identical profiles are welded to connect the lower frame sections. Holes have been made in the frame and nuts have been welded to fix the bolts that fasten the machine cover. Holes were also made to place the hydraulic quick couplings.

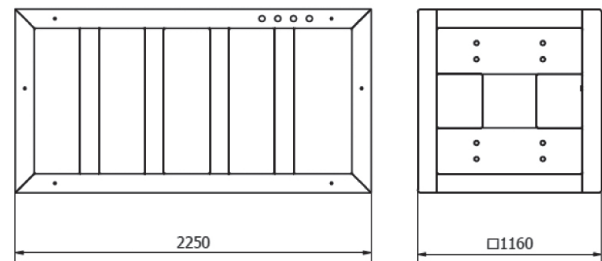


Fig. 10. Frame dimensions

A 50-mm-thick plate was welded to the front of the frame, which is responsible for transferring the force from the actuators to the side wall of the excavation (see Fig. 11).

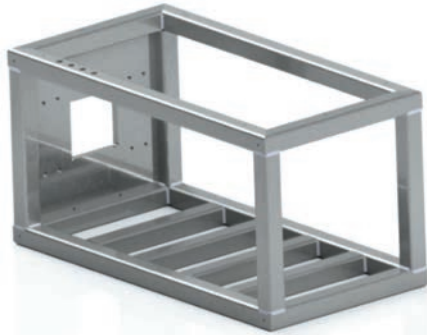


Fig. 11. Frame model 3D

4.7. Selection of actuators and hydraulic Power Pack

Two, symmetrically spaced, actuators were selected to evenly distribute the workload. They have to fulfill two tasks, the first one is being to provide the required force to pull the cutting head, and the second one is to provide enough stroke to allow the ratchet tooth to move to the next hole in the rod. The selected actuator was WHC027 – 160×90×600, which parameters are shown in Table 2 [10].

Table 2
Actuator specifications

$\varnothing D_w$	160 mm	piston diameter
$\varnothing d$	90 mm	piston rod diameter
G_w	M100×2	thread size
xL	600 mm	actuator stroke
L	842 mm	dimension without threaded part
L_c	943 mm	closing dimension
C	40 mm	extend the actuator
PD	70 mm	dimension for hydraulic connection 1
Pz	662 mm	dimension between hydraulic connections
p	25 MPa	nominal pressure

A suitable power supply should provide the appropriate pressure value and hydraulic oil volume flow. A power supply with the parameters shown in Table 3 was selected to supply the previously selected actuators.

Table 3
Hydraulic power pack parameters

Oil tank capacity	50 l
Oil flow rate	12 l/min
Working pressure	25 MPa

4.8. Hydraulic circuit diagram

Figure 12 shows a diagram of the hydraulic system of the discussed device. The operating method of the system should ensure uniform ejection of the actuators (1, 2) regardless of the load, with a flow divider (3) selected for this purpose. A controlled check valve (4) prevents uncontrolled movements of the actuators. The control uses a 4-way 3-position hydraulic solenoid valve (5) which controls the direction of hydraulic oil flow. The drive system is supplied through a spring loaded check valve (7). A safety valve (6) is used to protect the pump from pressure build-up. The source of pressure in the system is the hydraulic power pack, which consists of a pump (8), a coupling (9), a motor (10), a suction filter (11) and an oil tank (12).

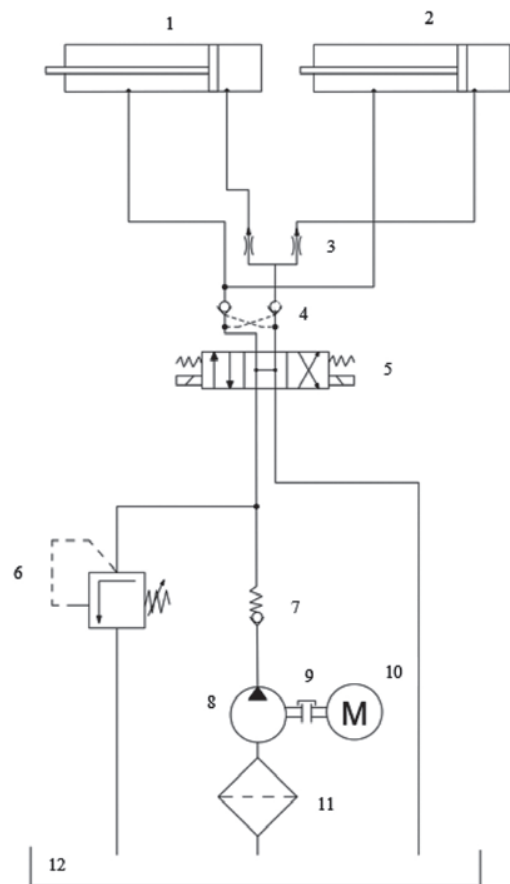


Fig. 12. Hydraulic diagram

5. DRIVE SYSTEM

The drive system (Fig. 13) consists of two hydraulic cylinders (1) mounted symmetrically on a plate that rests against the side wall of the trench during operation. The cylinders set the pawl (2) in motion. The force is transmitted from the cylinders to the pawl via

two pins (4). A loose fit between the pawl and the pins allows the pawl to pivot. Longitudinal holes (3'') have been made in the poles, which cooperate with the pawl tooth, allowing the force to be transferred to subsequent rods and the working unit of the device to move (rods with working head) in the direction indicated by the arrow (5).

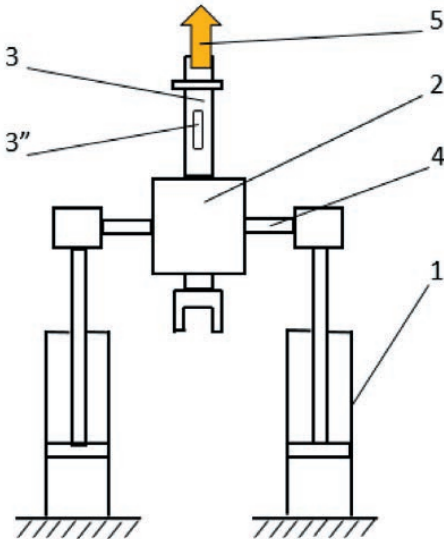


Fig. 13. Schematic of drive system

The overall dimensions of the machine are given in Figure 14, while Figures 15 and 16 show views of the developed system. The designed cracking machine consists of a frame (1) in which the machine components are located. A corrugated plate (7) is welded to the underside of the frame. The housing of the machine is made of perforated sheet metal (16) and a back solid sheet (15). An inspection door (17) is provided in the machine casing to allow access to the drive system.

During operation, the unit is supported against the excavation wall by a sheet metal plate (8) to which the hydraulic cylinders (5) are attached by means of

plates (9). To protect the actuators from bending, the support brackets (10) that are welded to the frame are bolted to the actuators. The pawl (2) and pawl cover (3) are connected to the actuators with a pin. The pin is fixed in the end of the piston rod (11) and is secured against sliding out by the cap bolted with screws (12). The pawl sets the rods (4) in motion, which move along the element (6) that fixes the position of the rods vertically and ensures contact between the rods and the pawl. The machine is divided into two compartments by sheet metal (13), which has two functions: the first is to support the element (6) and the second is to protect the hydraulic lines from movement of the drive system elements. Rods are connected by means of expanding pins (14). In the upper part of the device, there are eyebolts (19) used to hang the device for transport. To facilitate hydraulic connection, the machine is equipped with hydraulic quick couplings (18).

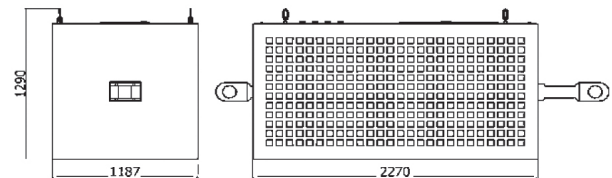


Fig. 14. Dimensions of the device

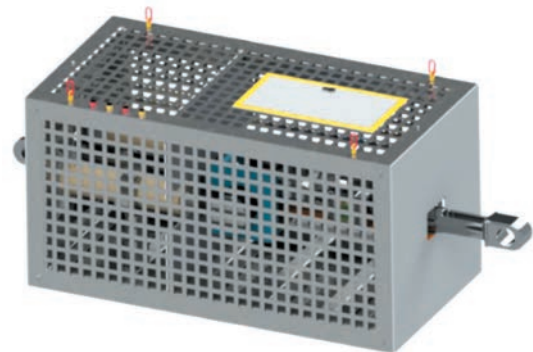


Fig. 15. Cracking machine

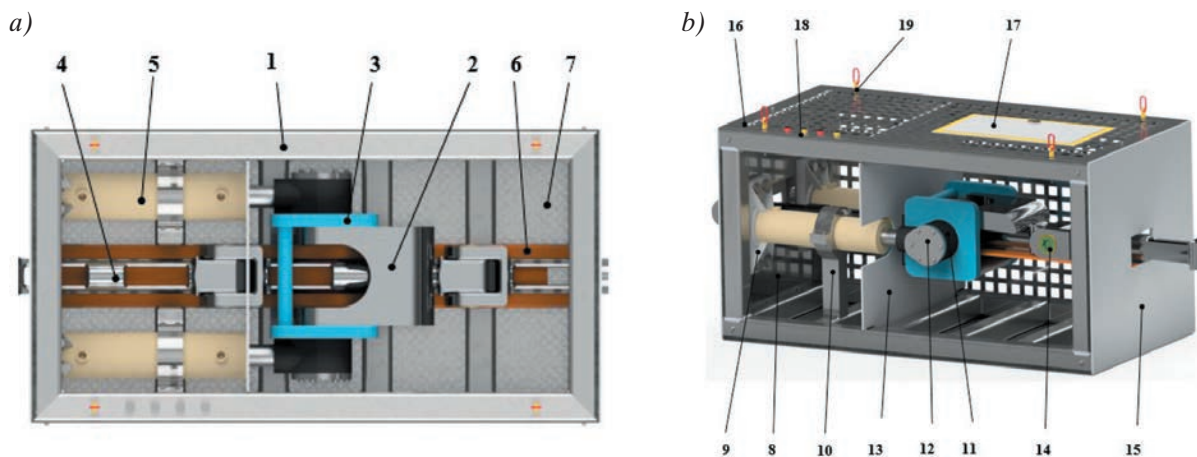


Fig. 16. Cracking machine, views: a) without top cover; b) without side cover

6. OPERATION OF THE MACHINE

To ensure the proper functioning of the device, a service trench with dimensions of 5×2 m and a depth adapted to the depth of the pipeline to be replaced must be dug. The machine (Fig. 17, pos. 1) should be placed in the trench and leveled. The axis of the drive rods should coincide with the center of the cross section of the pipe to be replaced. After placing the machine in the trench, the hydraulic hoses connect to the hydraulic quick couplings. The rods (2) are to be placed in the repaired pipeline, and the cutting/crushing head (1) attached to the last one. Expansion pins (3)

should be used to connect the rods. When the hydraulic power pack is turned on, the actuators set in motion a pawl, the tooth of which falls into a hole in the rods and unilaterally blocks the movement of the pawl relative to the rods and together they pull the cutting/crushing head. The return movement of the actuator causes the pawl to move relative to the non-moving rods. The device crushes or cuts the old pipeline with the head, leaving pieces of it in the ground. The new pipe is pulled in with the head. After the renovation, the new pipe takes over the functions of the old one. After pulling, the rods are laid out in the trench (5).

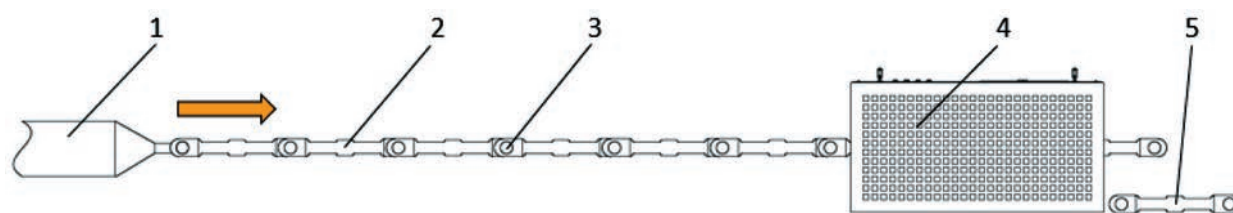


Fig. 17. Operation of the machine

7. SUMMARY

The paper presents a proposal for the modernization of the design of a device for trenchless pipe replacement by means of the static cracking method. The developed device enables the replacement of pipelines with a length of 80 m and a diameter of up to 400 mm.

In the project, special attention was paid to the most loaded elements of the machine and appropriate strength calculations were performed. The proposed solutions, especially the new concept of the rod and the method of its drive, can make the presented system competitive in relation to currently used devices for static cracking.

References

- [1] Zwierzchowska A.: *Koszty budowy sieci podziemnych wykonywanych metodami tradycyjnymi i bezwykopowymi*. Inżynieria Bezwykopowa 2006, 1: 26–32.
- [2] Kuliczkowski A., Kuliczowska E., Zwierzchowska A., Zwierzchowski D., Dańczuk P., Kubicka U., Kuliczkowski P., Lisowska J.: *Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska: praca zbiorowa*. Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
- [3] Ćwiertnia R., Ćwiertnia T.: *Analiza wybranych technologii bezwykopowej renowacji sieci wodociagowych i kanalizacyjnych*. Przegląd Budowlany 2018, 7–8: 42–50.
- [4] Derwich P.: *Dobieramy odpowiednią wielkość maszyny przeciskowej*. Inżynieria Bezwykopowa 2019, 3: 82.
- [5] Saint-Gobain PAM DIREXIONAL, Warszawa 2012.
- [6] Kublik K.: *Kraking statyczny, Bezwykopowa wymiana rurociągów*. Inżynieria Bezwykopowa 2016, 2: 74–77.
- [7] Mazanek E.: *Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn*, t. 1. WNT, Warszawa 2015.
- [8] Dietrich M. (red.), *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 1. WNT, Warszawa 1999.
- [9] Korewa W., Zygmunt K.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 2. WNT, Warszawa 1975.
- [10] WROPOL Engineering sp. z o.o., Technical Report, Miękinia 2020.

BARTOSZ GÓRALCZYK, Eng.
 WOJCIECH HORAK, Prof.
 AGH University of Science and Technology
 al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
 goralczy@student.agh.edu.pl
 horak@agh.edu.pl

BARTOSZ GÓRALCZYK
WOJCIECH HORAK

Urządzenie do bezwykopowej wymiany rur metodą krakingu statycznego

Dążenie do minimalizacji zaburzeń ładu powierzchniowego podczas prowadzenia prac ziemnych stanowi ważny aspekt współczesnej inżynierii lądowej. Naprzeciw tym oczekiwaniom wychodzą różne technologie umożliwiające prowadzenie tego typu prac z wykorzystaniem metod bezwykopowych. Metoda krakingu statycznego umożliwia rozbudowę, modernizację lub rehabilitację istniejącej infrastruktury podziemnej. W pracy przedstawiono projekt urządzenia przeznaczonego do bezwykopowej wymiany rur metodą krakingu statycznego. Opracowana konstrukcja wyróżnia się zastosowaniem nowego typu układu napędowego z wykorzystaniem żerdzi przegubowych. Ponadto w pracy zaproponowano sposoby rozwiązania głównych zagadnień konstrukcji tego typu urządzenia.

Słowa kluczowe: projektowanie, kraking statyczny, technologie bezwykopowe

1. WSTĘP

Metody wykopowe polegające na wykonaniu wykopu na całej długości prowadzonych prac ziemnych są naturalnym i od lat stosowanym sposobem wymiany oraz układania przewodów podziemnych. Wykorzystywanie tych metod wiąże się jednak z długim czasem prowadzenia prac oraz ze znacznym kosztem, zwiększającym się wraz z głębokością wykopu. Dążenie do zminimalizowania zasięgu i wielkości wykopów niesie za sobą wiele pozytywnych aspektów zarówno pod względem ekologicznym, ekonomicznym, jak i prawnym [1].

Rozwój miejskich aglomeracji, dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacyjnej oraz rosnące wymagania dotyczące ingerencji prac ziemnych w otoczenie wymuszają poszukiwanie alternatywnych w stosunku do wykopowych metod i technologii prowadzenia prac ziemnych. Z tego względu w ostatnich latach znacznie rozwinęły się metody bezwykopowe, które stanowią tańszą i szybszą metodę realizacji tego typu prac. Istotną zaletą technologii bezwykopowych jest stosunkowo niewielka ingerencja w środowisko oraz bezpośrednie otoczenie miejsca prowadzenia prac.

Istnieje szereg różnych bezwykopowych metod, takich jak mikrotunelowanie, przeciski hydrauliczne, metoda krakingu oraz naprawy środkami żywicznymi [2]. Wymiany rur metodami bezwykopowymi, które należą do jednej z gałęzi technologii bezwykopowych moż-

na podzielić na technologie z pozostawieniem oraz usunięciem starego przewodu z gleby. Pierwsza z nich – znana pod nazwami takimi jak Pipe Cracking oraz Pipe Bursting – jest przedmiotem niniejszego opracowania. Metodę krakingu stosuje się wszędzie tam, gdzie celem prac jest zwiększenie średnicy zużytego przewodu i podczas wymiany należy ją powiększyć tak, aby spełniała należne wymagania. Innym sposobem renowacji rurociągów są metody napraw środkami żywicznymi, które jednak skutkują znaczącym zmniejszeniem średnicy wewnętrznej wymienianych kanałów [3].

W pracy przedstawiono projekt urządzenia do bezwykopowej wymiany rur metodą krakingu statycznego.

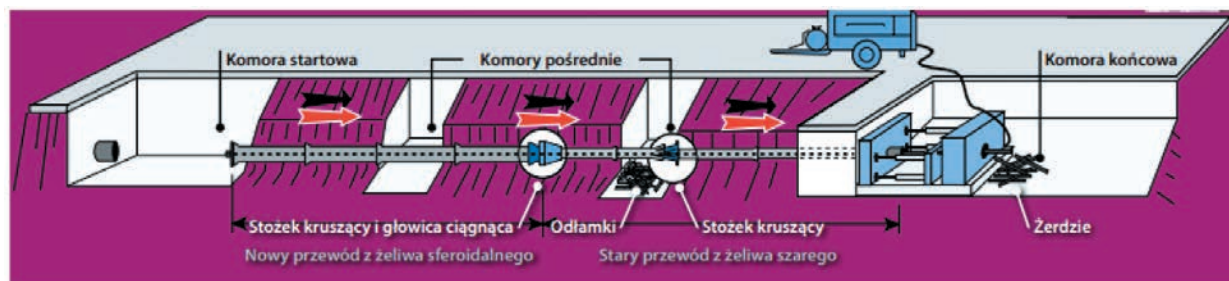
2. TECHNOLOGIA KRAKING

Kraking wykorzystuje metodę niszczenia starych rur polegającą na propagacji pęknięć spowodowanych lokalną koncentracją naprężeń od punktowych obciążeń generowanych przez głowicę tnącą. Niszczenie może polegać również na kruszeniu, rozrywaniu lub rozcinaniu materiału. Metoda rozpoczyna się od wykopu komory startowej i końcowej pomiędzy którymi mieści się odcinek rurociągu wymagający wymiany (rys. 1).

Kolejnym krokiem jest wprowadzenie do starego przewodu żerdzi lub liny, które mają za zadanie ciągnąć głowicę tnącą i cały rurociąg po uprzednim za-

czepieniu. Po wprowadzeniu żerdzi lub liny zaczyna się jeden z najważniejszych etapów procesu. Polega on na zaczepieniu żerdzi lub liny i wprowadzeniu do starego przewodu głowicy o odpowiednio większej średnicy, która rozrywa go i pozwala na wciągnięcie nowej rury do środka. Głowica powinna mieć minimum 10%

większą średnicę od nowego przewodu, który należy wciągnąć. Unika się wtedy problemów z zakleszczeniem nowego przewodu w glebie. Nie powinno się także robić zbyt dużego otworu z uwagi na możliwość zapadania się gruntu na powierzchni [4]. Odlamki starego przewodu po zniszczeniu zostają w glebie.



Rys. 1. Schemat układu do krakingu statycznego [5]

3. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

Założono, że maksymalna średnica nowej rury wynosi 450 mm, a minimalna średnica rury wymienianej w tym przypadku wynosi 400 mm. Relacje pomiędzy średnicami rur nowych a wymienianych przedstawiono w tabeli 1. Na zielono wyróżniono zakresy stosowania maszyny przy aktualnie zaprojektowanych żerdziach, czerwony kolor oznacza, że główna jednostka spełnia zapas mocy, natomiast żerdzie są za szerokie.

Czarny kolor oznacza ogólną relację powiększania średnic już istniejących przewodów [2].

Maksymalna długość wymienianego rurociągu dla metody krakingu wynosi 120 metrów [2]. Biorąc pod uwagę klasyczny przypadek maszyny wykonującej wymianę rur metodą krakingu, założono długość wymienianego przewodu $l = 80$ m.

Maszyna będzie ciągnęła głowice (brak przepychania) w celu wykluczenia naprężeń ściskających i narażenia elementów na wyboczenie. Żerdzie będą rozciągane.

Tabela 1
Możliwości powiększania średnic

Średnica nowej rury [mm]	Średnica rury wymienianej [mm]															
	50	75	100	125	150	200	225	250	300	350	375	400	450	500	525	600
63	●					Legenda										
90	●	●				●	Możliwość zastosowania opisanej maszyny									
110	●	●	●			●	Wystarczająca moc, potrzeba wymiany żerdzi									
125	●	●	●			●	●	●	Możliwości wymiany metodą krakingu							
180		●	●	●	●											
200			●	●	●											
225			●	●	●	●										
250			●	●	●	●	●									
280				●	●	●	●	●								
315					●	●	●	●	●							
355					●	●	●	●	●	●						
400						●	●	●	●	●	●					
450						●	●	●	●	●	●	●				
500						●	●	●	●	●	●	●	●			
560									●	●	●	●	●	●	●	
630										●	●	●	●	●	●	●

4. PROJEKT URZĄDZENIA

4.1. Wymagana siła robocza

Na podstawie empirycznego równania (1) [6] wyznaczono wymaganą siłę ciągnięcia głowicy roboczej:

$$F = \frac{\pi \cdot g \cdot (D^2 - d^2)}{4800} [\text{kN}] \quad (1)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),
 D – średnica nowej rury zwiększona o 20%
($D = 540 \text{ mm}$),

d – średnica rury podlegającej renowacji
($d = 400 \text{ mm}$),

4800 – parametr dobrany empirycznie.

Przy uwzględnieniu górnych wartości średnic przyjętych w założeniach konstrukcyjnych, tj. $D = 540 \text{ mm}$ oraz $d = 400 \text{ mm}$, maksymalna siła robocza wynosi 845 kN. Ze względu na zapewnienie nadwyżki siły roboczej do dalszych obliczeń przyjęto wartość siły użytkowej projektowanej maszyny 1 MN.

4.2. Konstrukcja żerdzi

Jednym z głównych podzespołów projektowanego układu, który ma istotny wpływ na budowę oraz sposób funkcjonowania urządzenia, jest konstrukcja żerdzi. Żerdzie mają za zadanie zapewnić przeniesienie wymaganej siły roboczej, a ich konstrukcja definiuje sposób przekazywania siły z układu hydraulicznego na głowicę tnąco-kruszącą. W omawianym projekcie rozważono zastosowanie dwóch koncepcji konstrukcji tych elementów.

Walcowe żerdzie gwintowane

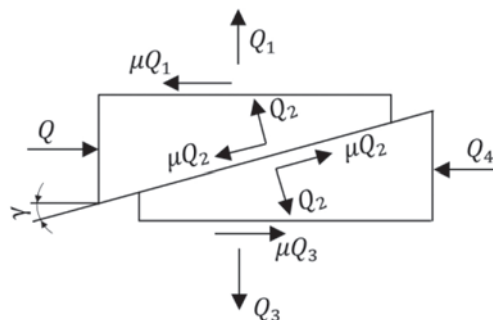
Często stosowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie żerdzi z końcami gwintowanymi (rys. 2).



Rys. 2. Żerdź gwintowana

Do tego rozwiązania przystosowane jest specjalne połączenie rozprężno-zaciskowe (rys. 3), które służy do przeniesienia napędu na czynnik roboczy. Połączenie przenosi siłę tylko w jedną stronę, w drugą stronę zapewnia swobodny powrót siłownika. Rozwiązanie to charakteryzuje się bardzo dobrą wytrzymałością mechaniczną. Główną wadą tej metody jest konieczność skręcania/rozkrećania prętów w wykopie

podczas wprowadzania i wyciągania prętów z maszyny. Jest to spowodowane brakiem elastycznych połączeń pomiędzy żerdziami, które umożliwiłyby ruch względny (kątowy) pomiędzy nimi.



Rys. 3. Połączenie rozprężno-zaciskowe [7]

Żerdzie przegubowe

Aby zniwelować niedogodności występujące w przypadku użytkowania żerdzi skręcanych, w niniejszej pracy zaproponowano nową konstrukcję żerdzi (rys. 4). Łączenie żerdzi odbywa się za pomocą przegubów. Uzyskano dzięki temu zwiększenie elastyczności zestawu żerdzi, a przez to możliwość łączenia/wyciągania ich poza wykopem. Połączenie przegubowe zabezpiecza również przed powstaniem naprężeń zginających w miejscu łączenia żerdzi. Omawiany wariant konstrukcyjny oparty jest na połączeniu sworzniowym. Konstrukcja żerdzi wymusza zmianę sposobu przekazywania siły z metody ciernej (rozprężno-zaciskowej) na metodę kształtową. Elementem, który spełnia zadanie przeniesienia napędu, jest zapadka liniowa o odpowiedniej geometrii. W celu realizacji sprzężenia zapadka-żerdź w części walcowej żerdzi wykonano otwory współpracujące z zapadką.



Rys. 4. Żerdź przegubowa

Dla przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz oszacowanych obciążeń układu roboczego przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe żerdzi. Z uzyskanych wartości wynika, że największe naprężenie w żerdzi wynosi 312,5 MPa, natomiast największy nacisk powierzchniowy występuje w widelkach i wynosi 81,2 MPa. Otrzymane wartości naprężeń wskazują, że istnieje możliwość wykonania żerdzi z wykorzystaniem większości stali o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i dobrej spawalności. Jest to istotne ze względu na sposób ukształtowania tych elementów.

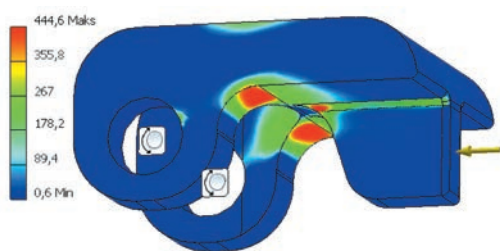
4.3. Konstrukcja zapadki liniowej

Geometrię zaprojektowanej zapadki liniowej przedstawiono na rysunku 5. Element ten ma za zadanie przeniesienie siły z układu hydraulicznego, ciągnącej żerdzie, a następnie umożliwienie powrotu siłowników do pozycji wyjściowej względem nieruchomych żerdzi.



Rys. 5. Zapadka liniowa

Zaprojektowana zapadka została poddana analizie wytrzymałościowej MES. Największe naprężenia występują w miejscu oznaczonym czerwonym kolorem widocznym na rysunku 6.



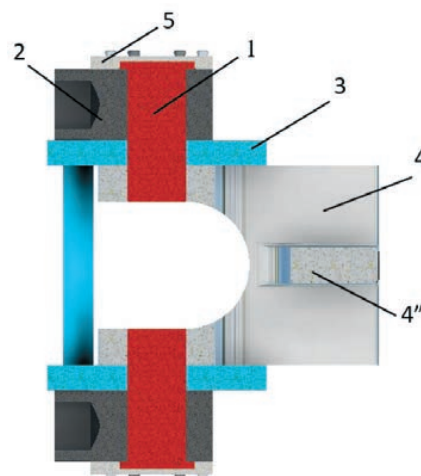
Rys. 6. Analiza MES zapadki liniowej

Maksymalne naprężenia zredukowane według hipotezy H-M-H wynoszą blisko 445 MPa i występują w postaci lokalnych skupisk. Uzyskano zadowalającą sztywność zapadki, maksymalne odkształcenie wynosi mniej niż 2 mm.

4.4. Obliczenia sprawdzające sworznie zapadki

Sworzeń w zapadce jest utwierdzony jednostronnie w tulei o grubości g . Takie osadzenie wynika z przechodzących przez zapadkę żerdzi, które uniemożliwiają obustronne podparcie sworznia.

Na rysunku 7 pokazano przekrój zespołu zapadki, omawiany w rozdziale sworznie opisano numerem (1), przenosi on siłę między zapadką liniową (4) a siłownikiem (2), przed wysunięciem sworznia chroni pokrywa (5), ząb zapadki (4'') umożliwia przesuwanie się żerdzi. Osłonę zapadki oznaczono numerem (3).



Rys. 7. Złożenie zapadki

Utwierdzenie jednostronne nie jest korzystne z punktu widzenia wytrzymałościowego, ponieważ występuje przeginanie sworznia (rys. 7, pozycja 1) podczas kolejnych cykli pracy. Ze względu na charakter obciążenia, w celu zapewnienia trwałości i niezawodności układu, konieczne jest wykonanie obliczeń zmęczenia sworznia.

Aby sprawdzić wartość rzeczywistego współczynnika bezpieczeństwa δ , posłużono się wzorem Soderberga [8], który określa współczynnik bezpieczeństwa dla cykli niesymetrycznych:

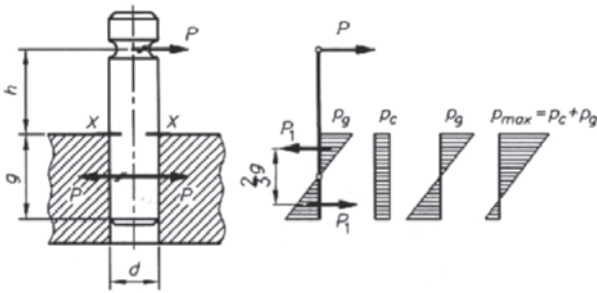
$$\delta = \frac{Z_{gj}}{\frac{\beta \cdot \sigma_a}{\epsilon} + Z_{gj} \cdot \frac{\sigma_m}{R_{eg}}} \quad (2)$$

gdzie:

- R_{eg} – granica plastyczności przy zginaniu [MPa],
- Z_{gj} – granica zmęczenia zginania jednostronnego [MPa],
- β – współczynnik stanu powierzchni [–],
- ϵ – zależność wielkości przekroju od współczynnika kształtu [–],
- σ_a – amplituda naprężeń [MPa],
- σ_m – naprężenia średnie [MPa].

Ponadto wykonano obliczenia sprawdzające wartość nacisków powierzchniowych w połączeniu sworzni-żerdź oraz sworzni-zapadka.

Ze względu na jednostronne zamocowanie sworzni w żerdzi całkowity nacisk powierzchniowy w połączeniu jest sumą nacisku wynikającego z działania siły w kierunku normalnym do powierzchni roboczej sworznia oraz pary sił równoważących moment zginający. Przyjęty model obciążeń odpowiada schematowi przedstawionemu na rysunku 8.



Rys. 8. Uproszczony model obciążenia sworznia [7]

Wartość maksymalnych nacisków powierzchniowych w połączeniu sworzni-żerdź wyraża się zależnością [9]:

$$p_{\max 1} = \frac{P \left(6 \frac{h}{g_1} + 4 \right)}{g_1 d} \quad (3)$$

natomiast w przegubie sworzni-zapadka:

$$p_{\max 2} = \frac{P}{g_2 d} \quad (4)$$

gdzie:

- h – odległość od miejsca przyłożenia siły do powierzchni [mm],
- g_1 – głębokość osadzenia sworznia w żerdzi [mm],
- g_2 – głębokość osadzenia sworznia w zapadce [mm],
- P – siła działająca na sworznię [kN],
- d – średnica sworznia [mm].

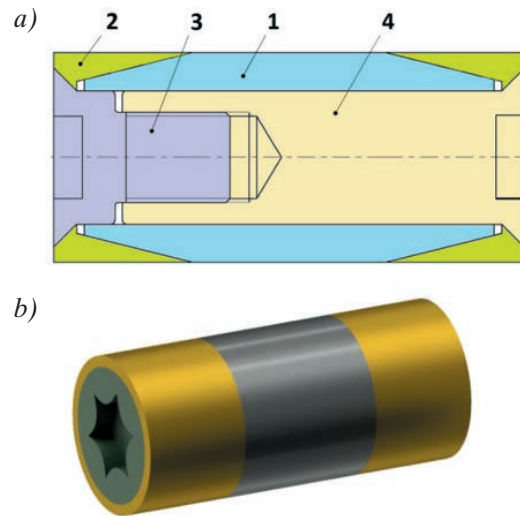
Na podstawie zależności (2) wyznaczono wartość współczynnika bezpieczeństwa $\delta = 1,29$. Natomiast z zależności (3) oraz (4) otrzymano naciski dopuszczalne $p_{\max 1} = 227,5$ MPa oraz $p_{\max 2} = 59,6$ MPa.

Otrzymana wartość współczynnika bezpieczeństwa, ze względu na wytrzymałość zmęczeniową połączenia zapewnia poprawne funkcjonowanie układu. Natomiast wyniki dotyczące nacisków powierzchniowych wskazują, że konieczne może być dodatkowe tulejowanie otworów sworzni w żerdziach z wykorzystaniem tulei ze stali wysokiej jakości, ulepszanej cieplnie.

4.5. Konstrukcja sworznia żerdzi

Ograniczona ilość miejsca pomiędzy żerdziami a zapadką ma wpływ na wymiary sworznia łączącego żerdzie. Z tego względu niemożliwe jest wykorzystanie typowego sworznia z łbem lub sworznia zabezpieczonego przed przesunięciem osiowym za pomocą zawleczek. Koncepcja osadzenia sworznia z wykorzystaniem połączenia wciskowego, ze względów eksploatacyjnych również musi zostać odrzucona z powodu długiego czasu wciskania sworznia oraz zużywania się elementów przy częstym łączeniu i rozłączaniu. Do

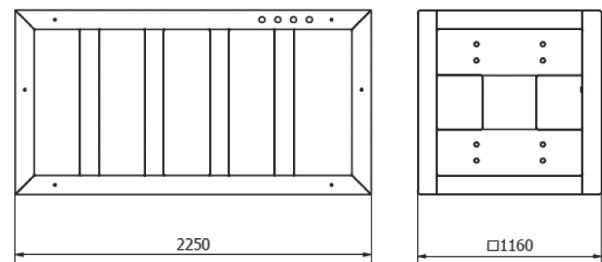
omawianej konstrukcji urządzenia opracowano projekt koncepcyjny sworznia rozprężnego (rys. 9) łączącego żerdzie, w którym wyeliminowano powyższe problemy. Sworznię rozprężną składa się z osi stożkowej (1) z wyciętym otworem, która jest mocowana w uchu i widelkach jako pierwsza. Następnie wkłada się tuleję stożkową (2), po czym umieszcza się śrubę z łbem stożkowym (3) oraz sworznię z łbem stożkowym zakończony otworem gwintowanym (4). Śruba wraz ze sworzniem są ze sobą skręcane, co powoduje docisk do powierzchni i zapobiegnięcie przesuwaniu się zespołu sworznia rozprężnego.



Rys. 9. Sworznię rozprężną: a) przekrój; b) widok

4.6. Konstrukcja ramy

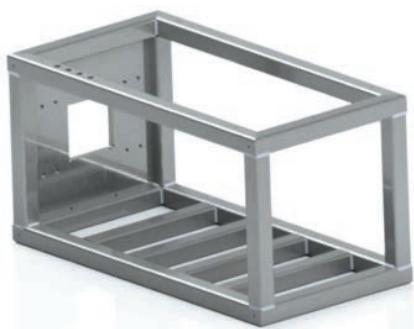
Rama (rys. 10 i 11) spawana jest z profili kwadratowych $120 \times 120 \times 8$. W celu zwiększenia sztywności ramy dospawane zostaną cztery takie same kształtowniki łączące dolne profile ramy i będące oparciem w trakcie spawania dla blachy ryflowanej. W ramie wykonano otwory oraz przyspawano nakrętki spawalnicze w celu zamocowania śrub mocujących osłonę maszyny. Wykonano również otwory w celu umieszczenia szybkozłącz hydraulicznych.



Rys. 10. Rama wymiary gabarytowe

Rama spawana jest wraz z płytą dociskową o grubości 50 mm. Jej zadaniem będzie rozłożenie siły po-

chodzącej od siłowników. Płyta dociskowa posiada otwory pod montaż siłowników.



Rys. 11. Rama model 3D

4.7. Dobór siłowników i zasilacza hydraulicznego

Aby równomiernie rozłożyć obciążenie, dobrane zostaną dwa symetrycznie rozstawione siłowniki, muszą one spełnić dwa zadania, pierwsze z nich to zapewnić wymaganą siłę do przeciągnięcia głowicy tnącej, a drugie z nich to zapewnienie odpowiedniego skoku do umożliwienia przesunięcia się zęba zapadki do kolejnego otworu w żerdzi. Dobrano został siłownik o oznaczeniu WHC027 – 160×90×600 [10], którego parametry zestawiono w tabeli 2 [10].

Tabela 2
Parametry siłownika

$\varnothing D_w$	160 mm	średnica tłoka
$\varnothing d$	90 mm	średnica tłoczyska
G_w	M100×2	rozmiar gwintu
xL	600 mm	skok siłownika
L	842 mm	wymiar bez części gwintowanej
L_c	943 mm	wymiar przy zamknięciu
C	40 mm	wysunięcie siłownika
PD	70 mm	wymiar do przyłącza hydraulicznego 1
Pz	662 mm	wymiar między przyłączami hydraulicznymi
p	25 MPa	ciśnienie nominalne

Odpowiedni zasilacz powinien dostarczyć należne ciśnienie potrzebne do przepchnięcia tłoka oraz strumień objętości przepływającego czynnika.

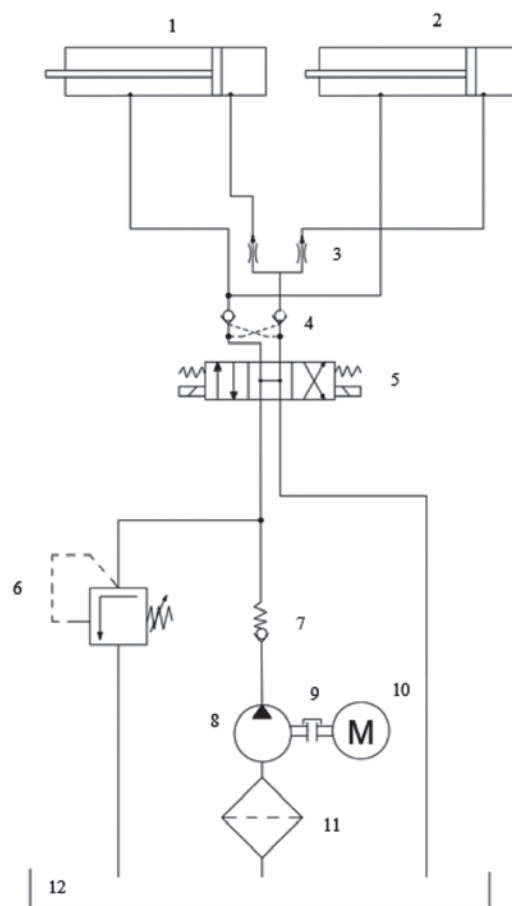
Dlatego dobrane zasilacz hydrauliczny o parametrach widocznych w tabeli 3.

Tabela 3
Parametry zasilacza hydraulicznego

Zbiornik oleju	50 l
Przepływ	12 l/min
Ciśnienie	25 MPa

4.8. Schemat hydrauliczny

Aby ułatwić dobór odpowiednich elementów hydraulicznych do maszyny, narysowano schemat hydrauliczny (rys. 12). Układ hydrauliki powinien zapewniać równomierny wysuw siłowników (1, 2) niezależnie od obciążenia, dlatego pomimo równego rozmieszczenia siłowników oraz równego ich obciążenia, dobrane dzielnik strumienia (3). Przed niekontrolowanymi ruchami siłowników chroni zawór zwrotny sterowany (4). Numerem (5) oznaczono zawór sterujący kierunkiem przepływu 4/3 sterowany za pomocą elektromagnesów, ustalony w pozycji środkowej za pomocą sprężyn. Do zabezpieczenia pompy przed wzrostem ciśnienia służy zawór redukcyjny (6). Numerem (7) oznaczono zawór zwrotny obciążony sprężyną. Zasilacz hydrauliczny składa się z elementów takich jak: pompa (8), sprzęgło (9), silnik (10), filtr ssawny (11) oraz zbiornik oleju (12).

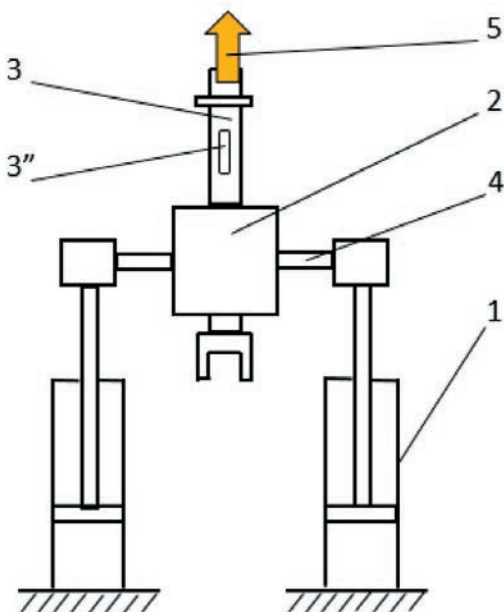


Rys. 12. Schemat hydrauliczny

5. KONSTRUKCJA UKŁADU NAPĘDOWEGO

Układ napędowy (rys. 13) składa się z siłowników hydraulicznych (1) zamocowanych symetrycznie na

płyce, która zaś opiera się o wykop. Siłowniki wprawiają w ruch zapadkę (2). Siła przenoszona jest z siłowników na zapadkę przez dwa jednostronnie utwierdzone sworznie (4). Między zapadką a sworzniami występuje pasowanie luźne umożliwiające obrót i poprawne funkcjonowanie układu. Poprzez obrót zapadki względem sworzni uzyskano ruch jednostronny (5) żerdzi (3). Oznaczony numerem (3'') otwór w żerdzi współpracuje z zębem zapadki i umożliwia przeniesienie siły na kolejne żerdzie.

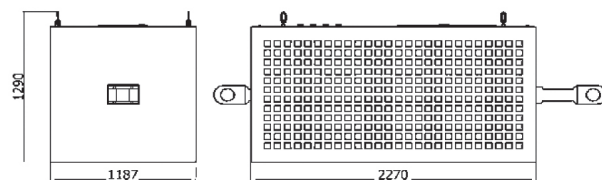


Rys. 13. Schemat układu

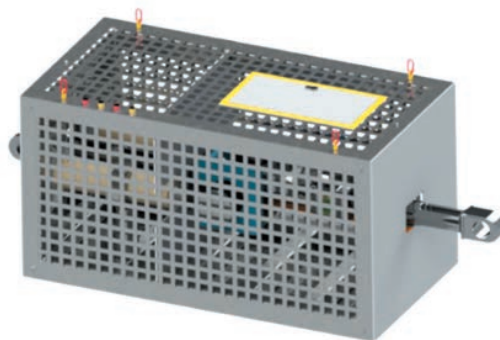
Wymiary gabarytowe maszyny podano na rysunku 14, natomiast rysunki 15 i 16 przedstawiają widoki opracowanego układu.

Zaprojektowana maszyna do krakingu składa się z ramy (1), w której znajdują się elementy maszyny. Od spodu ramy przyspawana jest blacha ryflowana (7).

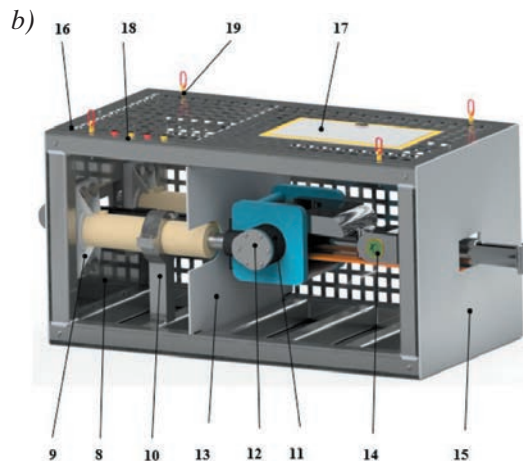
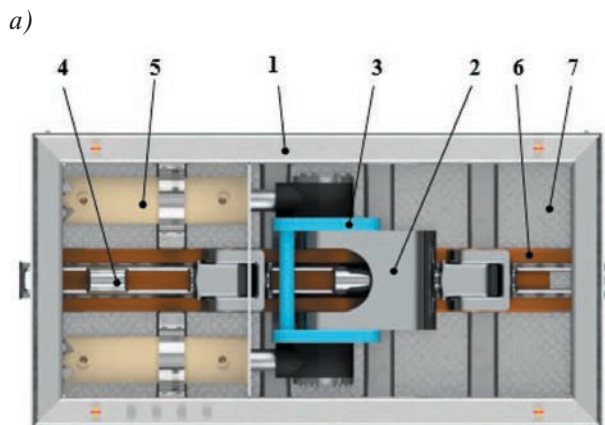
Aby umożliwić dostęp do środka maszyny w celu naprawy lub konserwacji elementów oraz podglądu w trakcie pracy, od boków oraz z góry przykręcana jest blacha perforowana (16). Blacha ta przykręcana jest do nakrętek spawalniczych wspawanych w ramę. Do naprawy drobnych usterek lub w razie zablokowania układu do blachy perforowanej przymocowane są drzwiczki rewizyjne (17). Aby zabezpieczyć przed przesuwaniem się maszyny w głąb wykopu przyspawano do ramy płyty podstaw (8) o grubości 50 mm o dużej powierzchni. Siłowniki (5) przyspawane są z płytą mocującą (9) zapewniającą rozłożenie siły, są one przykręcane do płyt podstaw, aby możliwa była ich wymiana. W celu zabezpieczenia siłownika przed ugięciem zastosowano podpory (10) spawane z ramą i skręcane z górną pokrywą. Zapadka (2) oraz osłona zapadki (3) połączone są z siłownikami sworzniem.



Rys. 14. Wymiary gabarytowe



Rys. 15. Maszyna do krakingu statycznego

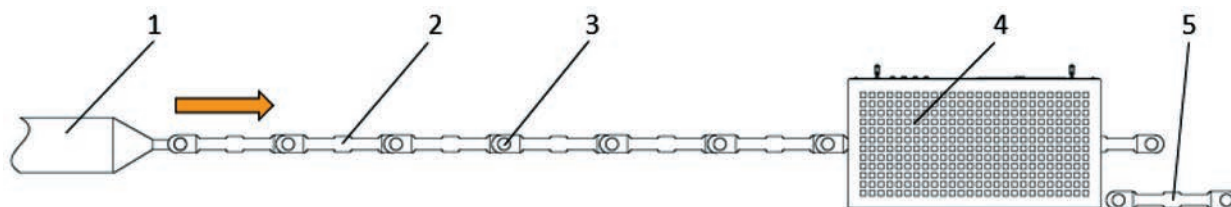


Rys. 16. Maszyna do krakingu, widoki: a) bez pokrywy górnej; b) bez pokrywy bocznej

Sworzeń ten jest utwierdzony w końcówce tłoczyska (11) oraz zabezpieczony jest przed wysunięciem z niej zaślepką skręcaną śrubami (12). Zapadka wprawia w ruch żerdzie (4), które poruszają się po elemencie (6), który ustala położenie żerdzi w pionie i zapewnia styk żerdzi z zapadką. Pierwsza część komory, w której znajdują się tuleje cylindrowe siłowników, oddzielona jest blachą przedziału (13) od komory drugiej, w której występują elementy ruchome maszyny (zapadka, osłona, tłoczysko itd.). Blacha przedziału spełnia dwie funkcje, pierwszą z nich jest podparcie elementu (6), a drugą jest zabezpieczenie przewodów hydraulicznych przed elementami ruchomymi. Blacha (15) służy do obudowy maszyny. Za pomocą sworzni rozprężnego (14) łączone są żerdzie. Śruby z uchem uchylno-obrotowym (19) służą do podwieszenia urządzenia w celu jego transportu. Aby ułatwić podłączenie hydrauliczne, maszynę wyposażono w szybkozłącza hydrauliczne (18).

6. SPOSÓB FUNKCJONOWANIA URZĄDZENIA

Do poprawnego funkcjonowania urządzenia należy wykopać komorę roboczą o rozmiarach 5 m na 2 m oraz głębokości dostosowanej do głębokości położenia wymienianego rurociągu.



Rys. 17. Funkcjonowanie maszyny

7. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł podyktowany jest wzrastającym zainteresowaniem stosowania technologii bezwykopowych do prowadzenia prac ziemnych.

W pracy przedstawiono projekt urządzenia do bezwykopowej wymiany rur metodą krakingu statycznego. Opracowane urządzenie umożliwia wymianę rurociągu o długości 80 m oraz średnicy do 400 mm.

W projekcie zwrócono szczególną uwagę na najbardziej obciążone elementy maszyny i przeprowadzono stosowne obliczenia wytrzymałościowe. Zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne, a w szczególności nowa koncepcja konstrukcji żerdzi oraz sposobu ich

Komorę roboczą należy wypoziomować. Środek otworu w płycie dociskowej powinien pokrywać się ze środkiem przekroju wymienianego przewodu. Urządzenie (rys. 17, pozycja 4) należy przetransportować do komory roboczej. Śruby obrotowo-uchylne służą do mocowania lin transportujących urządzenie. Po umieszczeniu maszyny w wykopie należy podłączyć przewody hydrauliczne do szybkozłączy hydraulicznych. Gdy żerdzie (2) znajdują się w wymienianej rurze, do ostatniego z nich należy zamocować głowicę tnącą/kruszącą (1). Następnie należy umieścić żerdzie połączone sworzniem rozprężnym (3) w otworze maszyny. Należy upewnić się, że drzwiczki rewizyjne są zamknięte oraz osłony są przykręcone. Należy włączyć pompę.

Po włączeniu pompy siłowniki hydrauliczne wprawiają w ruch zapadkę, której ząb wpada w otwór w żerdziach i jednostronnie blokuje poruszanie się zapadki względem żerdzi i razem ciągną głowicę tnącą/kruszącą. Ruch powrotny siłownika powoduje przemieszczenie się zapadki względem nieruchomych żerdzi.

Urządzenie kruszy lub rozcina stary rurociąg głowicą, pozostawiając jego kawałki w glebie. Nowy przewód wciągany jest wraz z głowicą. Po renowacji nowy przewód przejmuje funkcje starego rurociągu. Żerdzie po przeciągnięciu są rozkładane w wykopie (5) (rys. 17).

napędu mogą stanowić o konkurencyjności przedstawionego układu w stosunku do obecnie stosowanych urządzeń do krakingu statycznego.

Literatura

- [1] Zwierzchowska A.: *Koszty budowy sieci podziemnych wykonywanych metodami tradycyjnymi i bezwykopowymi*. Inżynieria Bezwykopowa 2006, 1: 26–32.
- [2] Kulickowski A., Kulickowska E., Zwierzchowska A., Zwierzchowski D., Dańczuk P., Kubicka U., Kulickowski P., Lisowska J.: *Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska: praca zbiorowa*. Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
- [3] Ćwiertnia R., Ćwiertnia T.: *Analiza wybranych technologii bezwykopowej renowacji sieci wodociągowych i kanalizacyjnych*. Przegląd Budowlany 2018, 7–8: 42–50.
- [4] Derwich P.: *Dobieramy odpowiednią wielkość maszyny przeciskowej*. Inżynieria Bezwykopowa 2019, 3: 82.

- [5] Saint-Gobain PAM DIREXIONAL, Warszawa 2012.
- [6] Kublik K.: *Kraking statyczny, Bezwykopowa wymiana rurociągów*. Inżynieria Bezwykopowa 2016, 2: 74–77.
- [7] Mazanek E.: *Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn*, t. 1. WNT, Warszawa 2015.
- [8] Dietrich M. (red.), *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 1. WNT, Warszawa 1999.
- [9] Korewa W., Zygmunt K.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, t. 2. WNT, Warszawa 1975.
- [10] WROPOL Engineering sp. z o.o., Technical Report. Miękinia 2020.

inż. *BARTOSZ GÓRALCZYK*
dr hab. inż. *WOJCIECH HORAK*, prof. AGH
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
goralczy@student.agh.edu.pl
horak@agh.edu.pl

**We would like to extend our heartfelt thanks to the reviewers of papers for
“MINING – Informatics, Automation and Electrical Engineering”
journal in 2020**

**Chcielibyśmy serdecznie podziękować recenzentom artykułów do czasopisma
„MINING – Informatics, Automation and Electrical Engineering” w 2020 roku**

Łukasz Bednarek, AGH University of Science and Technology (Poland)
Witold Biały, Silesian University of Technology (Poland)
Piotr Czaja, AGH University of Science and Technology (Poland)
Kazimierz Drozd, Lublin University of Technology (Poland)
Tomasz Drabek, AGH University of Science and Technology (Poland)
Krzysztof Filipowicz, Silesian University of Technology (Poland)
Lech Gładysiewicz, Wrocław University of Science and Technology (Poland)
Adam Heyduk, Silesian University of Technology (Poland)
Józef Jonak, Lublin University of Technology (Poland)
Ján Kačur, Technical University of Košice (Slovakia)
Stanisław Krawczyk, AGH University of Science and Technology (Poland)
Krzysztof Krauze, AGH University of Science and Technology (Poland)
Krzysztof Kotwica, AGH University of Science and Technology (Poland)
Mariusz Kuczaj, Silesian University of Technology (Poland)
Piotr Kulinowski, AGH University of Science and Technology (Poland)
Kamil Mucha, AGH University of Science and Technology (Poland)
Aleksander Nieoczym, Lublin University of Technology (Poland)
Zbigniew Niedbalski, AGH University of Science and Technology (Poland)
Krzysztof Pałka, Lublin University of Technology (Poland)
Henryk Paszcza, Industrial Development Agency JSC (Poland)
Adam Piestrzyński, AGH University of Science and Technology (Poland)
Janusz Petryna, State Higher Vocational School in Tarnów (Poland)
Marek Płonka, GIG Central Mining Institute (Poland)
Dariusz Prostański, KOMAG Institute of Mining Technology (Poland)
Barbara Tora, AGH University of Science and Technology (Poland)
Krzysztof Skrzypkowski, AGH University of Science and Technology (Poland)
Piotr Sobota, KOMAG Institute of Mining Technology (Poland)
Grzegorz Stopka, AGH University of Science and Technology (Poland)
Dawid Szurgacz, PGG S.A. KWK ROW Ruch Chwałowice (Poland)
Marek Szygła, KOMAG Institute of Mining Technology (Poland)
Stanisław Szweda, KOMAG Institute of Mining Technology (Poland)
Andrzej N. Wieczorek, Silesian University of Technology (Poland)
Tomasz Wydro, AGH University of Science and Technology (Poland)

