



Bogumił DUDEK, Rafał CZAPAJ

EPC S.A.

Postęp w dziedzinie robotyzacji i technik sztucznej inteligencji w pracach pod napięciem

Streszczenie. Artykuł omawia przegląd nowości technicznych z dziedziny robotyzacji i metod sztucznej inteligencji wykorzystywanych w energetyce w latach 2005-2007. Przedstawiono i omówiono roboty oraz zrobotyzowane urządzenia stosowane przez operatorów sieci przesyłowych i dystrybucyjnych na świecie. Nowymi argumentami przemawiającymi za wdrożeniem w polskiej energetyce robotów do prac inspekcyjno-eksploatacyjnych są zwiększenie bezpieczeństwa pracy ludzi, umożliwienie pracy w utrudnionych warunkach oraz obniżenie kosztów prac.

Abstract. (Development in robotics and artificial intelligence for live line maintenance). The paper discusses the review of technical news in the field of robotics and artificial intelligence used in power industry in years 2005-2007. Robotized tools and robots used by transmission and distribution system operators worldwide are presented and described. Among new advantages of robots' implementation in polish power industry for inspection and maintenance tasks are human safety, enabling work in hinder conditions and tasks costs reducing.

Słowa kluczowe: inspekcja i eksploatacja układów izolacyjnych, prace pod napięciem, robotyzacja, metody sztucznej inteligencji.

Keywords: insulators' inspection and maintenance, live line maintenance, robotics, artificial intelligence methods.

Wstęp

Robotyzacja w wielu dziedzinach życia przeżywa w ostatnich latach gwałtowny rozwój. W wielu krajach na świecie roboty wykorzystywane są z dużym powodzeniem w energetyce m.in. przy pracach inspekcyjno-eksploatacyjnych elementów izolacyjnych. Znane w wąskich kręgach i omówione w [1] roboty takie jak TOMCAT, ROBTET, ROV czy ROWASHI w znaczący sposób wspomagają ludzi w pracach na sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych. Do krajów szczytujących się zastosowaniami robotów w elektroenergetyce (USA, Japonia, Kanada, Hiszpania, Włochy), dynamicznie dołączyły w ostatnich latach Chiny oraz Korea Południowa tworząc własne roboty oraz Argentyna i Brazylia, które z powodzeniem łączą wyznaczone przez liderów w tej dziedzinie urządzenia z tradycyjnymi metodami prac inspekcyjno-eksploatacyjnych. Głównymi zadaniami ww. robotów są wymiana izolatorów, mycie izolacji, inspekcje linii oraz diagnostyka [1], natomiast omówione w niniejszym artykule roboty wykorzystywane są m.in. do czyszczenia na sucho izolatorów napowietrznych, inspekcji i pokonywania przeszkód na liniach napowietrznych, do kontroli i ułatwienia dostępu do urządzeń na stacjach transformatorowych, do inspekcji kabli podziemnych, oraz do wymiany elementów oświetlenia ulicznego. Rozwój robotyki wspierany jest także przez metody sztucznej inteligencji (SI) i ich sprzętowe realizacje, dzięki zwiększeniu mocy obliczeniowych komputerów, mikrokontrolerów oraz procesorów sygnałowych.

Robotyzacja dla potrzeb sieci przesyłowej

Robot czyszczący-inspekcyjny do izolatorów pod napięciem (Korea Płd.)

Czyszczenie izolatorów na mokro wymaga użycia dużych ilości wody, a jej transportowanie w terenie zagórzonym następcza wielu trudności, szczególnie w Korei Południowej, której większość obszaru charakteryzuje się takim ukształtowaniem. W celu ograniczenia wpływu powyższych trudności na jakość prac inspekcyjno-eksploatacyjnych stworzono, w Korea Electric Power Research Institute, robota do czyszczenia izolatorów na sucho. Czyszczenie odbywa się przy wykorzystaniu 2 obrotowych szczotek, napędzanych przez silnik prądu stałego, zamocowanych na 2 mechanizmach obrotowych z prowadnicami. Ponadto, robot (rys. 1) został podzielony

na konstrukcję zewnętrzną i wewnętrzną, z których każda posiada 2 zaciski współpracujące z łożyskami. Wewnętrzna konstrukcja wyposażona jest w prowadnice, łożyska, zaciski, listwę poślizgową oraz blokady przeciwoślizgowe. Podczas testów przeprowadzonych na wyłączonej linii polegających na czyszczeniu dwurzędowego łańcucha izolatorów składającego się z 36 izolatorów o największym poziomie zanieczyszczenia robot usunął wszystkie zanieczyszczenia w czasie 12 minut.



Rys. 1. Robot INCRO do czyszczenia izolatorów na sucho [2]

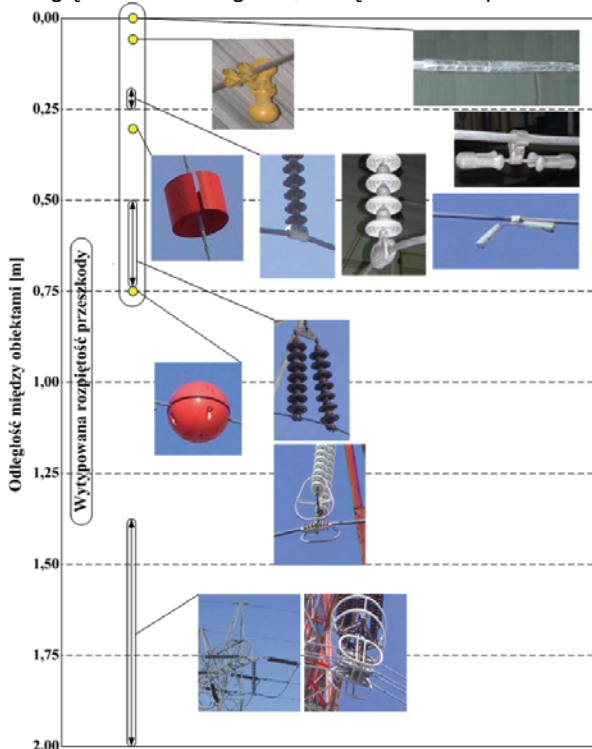
Bardzo ciekawym udoskonaleniem omawianego robota jest wbudowanie dodatkowych dwóch dodatkowych urządzeń pozwalających na wykonywanie zadań inspekcyjnych tj. pomiar rezystancji izolatorów oraz lokalizację pęknięć. Urządzeniami pozwalającymi na realizację powyższych zadań są tester rezystancji oraz lokalizator pęknięć. Tester rezystancji (rys. 2) został przetestowany na poligonie doświadczalnym w miejscowości Gochang na linii 345 kV.



Rys. 2. Tester rezystancji podczas testów [3]

LineScout - robot inspekcyjny pokonujący przeszkody na liniach przesyłowych (Kanada)

Zastosowaniem robota *LineScout* wykonanego w technologii *LineRover* od 2000 r udawadniano jego przydatność przy wykonywaniu zadań inspekcyjnych podczas prac pod napięciem. Niewielka waga od 25-35 kg, pozwala na poruszanie się po przewodach odgromowych oraz fazowych dowolnej średnicy. Cały system w związku z niewielkimi rozmiarami może zostać przewieziony przez śmigłowiec w odległe miejsca inspekcji. Przegląd elementów, na jakie może się natknąć robot został przedstawiony na rys.3, który klasyfikuje przeszkody ze względu na ich rozpiętość, którą robot musi pokonać.



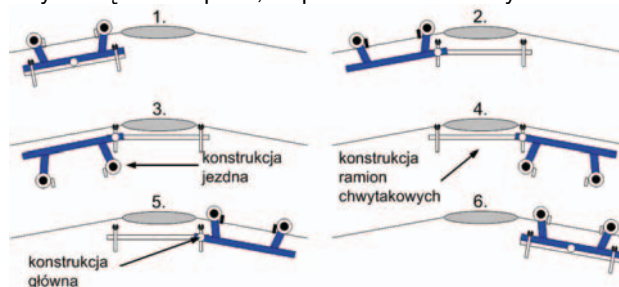
Rys.3. Klasyfikacja przeszkód pokonywanych przez robota ze względu na ich rozpiętość [4]

Specyfikacja techniczna (tab. 1) dla projektowanej technologii została ustalona ze względu na przyszłe zadania, obowiązujące techniki prac pod napięciem oraz ogólny kontekst wykorzystania projektowanej technologii.

Tabela 1. Dane techniczne robota wykonanego w technologii *LineScout* [4]

Charakterystyka elementów linii i otoczenia możliwych do pokonania przez robota	
Wyszczególnienie	Wartości
Średnica przewodu	12 – 60 mm
Średnica połączenia końcówek przewodów	25 – 85 mm
Maksymalna długość przeszkody	0,76 m
Maksymalna temperatura przewodu	95,0°C
Liczba przewodów w wiązce	1 – 4
Maksymalne nachylenie przęsła	30°
Temperatura otoczenia	0°C – 40°C
Dane techniczne robota i platformy	
Waga	100 kg
Długość	1,37 m
Wysokość	0,75 m
Siła napędowa	500 N
Prędkość liniowa	1,0 m/s
Żywotność baterii	5,0 godzin
Zasięg komunikacji z platformą	5,0 km
Maksymalne napięcie i prąd linii	735 kV – 1000 A

Robot *LineScout* zbudowany jest wokół 3 niezależnych konstrukcji: jezdnej (*Wheel Frame* - ciemny kolor), konstrukcji ramion chwytakowych (*Arm Frame* - jasny kolor) oraz konstrukcji głównej (*Center Frame* - biały okrąg), która łączy pozostałe dwie w całość. Pokonywanie przeszkody odbywa się w 6 etapach, co przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Sekwencja pokonywania przeszkody na linii przez robota [4]

Prototyp robota w technologii *LineScout* został przetestowany w polu elektrycznym wytwarzanym przez linię pod napięciem 315 kV i w wyniku testu, ani uszkodzeniu, ani zniszczeniu nie uległ żaden z elementów składowych. Odporność na silne pole magnetyczne także było przedmiotem testów na otwartej przestrzeni na specjalistycznej instalacji poprzez przemieszczanie robota wzdłuż przewodu pod obciążeniem 1000 A. Co ważniejsze powyższe testy potwierdziły łatwość sterowania robotem *LineScout* i skuteczność działania reguł bezpieczeństwa przy pokonywaniu przeszkód na wysokości 30 m nad ziemią (rys. 5).



Rys.5. Pokonywanie przeszkody przez robota w technologii *LineScout* na linii pod napięciem 315 kV [4]

Robotyzacja dla potrzeb sieci dystrybucyjnej
Robot asystowany przez człowieka z wykorzystaniem drążka izolowanego (Japonia)

Celem zbudowania robota, w którego pętli sterowania znaczny udział przejmuje człowiek było poszukiwanie zwiększonej wydajności oraz obniżonych kosztów zastosowania robota do prac inspekcyjno-eksploatacyjnych. Oba powyższe cele zostały osiągnięte przez japońskich inżynierów z Kyushu Electric Power Company (KEPCO), którzy stworzyli robota, którego manipulator jest pozycjonowany przez człowieka przy wykorzystaniu drążka izolowanego. Zadania wymagające dużej precyzji przydzielone zostały człowiekowi natomiast zadania żmudne i powtarzalne przydzielono do wykonywania robotowi. Robot oprócz bezpośredniej asysty człowieka wykorzystuje technologię rozpoznawania mowy ludzkiej (pomocnicza funkcja) oraz funkcję blokad, która zwiększa bezpieczeństwo wykonywanych prac (rys. 6).



Rys. 6. Wspomaganie efektora przez operatora [5]

Zautomatyzowany podnośnik do prac pod napięciem na stacjach transformatorowych 33, 66 i 132 kV (Argentyna)

Automatyczny podnośnik do prac pod napięciem na stacjach transformatorowych stanowi wynik 5-letnich prac badawczo-rozwojowych w argentyńskim AES CORP. (Empresa Distribuidora de Energía Norte). Podnośnik jest wynikiem kompromisu pomiędzy wysokimi kosztami nowoczesnych robotów stosowanych w elektroenergetyce na świecie oraz tradycyjnymi elementami i urządzeniami stosowanymi w pracach pod napięciem w Argentynie. Do elementów tych należy zaliczyć izolowane platformy, rusztowania, drabiny, wyroby szkłoepoksydowe, ramiona przegubowe podnoszone, ramiona izolowane Ritz, drabiny teleskopowe. Podnośnik umożliwia pracę na wysokości od 1,3 do 11,2 m oraz w poziomym zasięgu do 8,7 m (rys. 7). Podnośnik waży 2 270,0 kg, maksymalne obciążenie kosza wynosi 128,0 kg. Maksymalna prędkość drogowa, jaką może osiągnąć pojazd z zamontowanym wysięgnikiem wynosi 90 km/h.



Rys.7. Zautomatyzowany wysięgnik podczas prac pod napięciem [6]

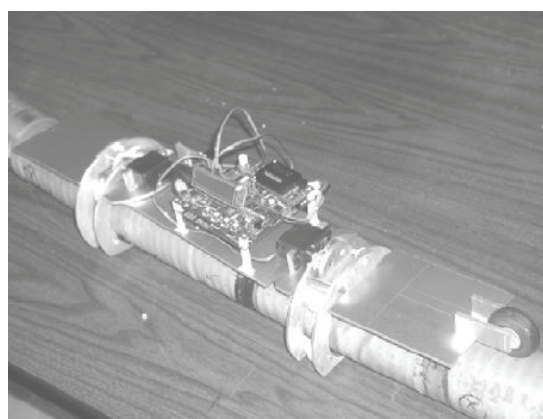
Robot do inspekcji kabli podziemnych (Kanada)

Jak wykazują badania prawie 2/3 wszystkich kabli podziemnych, co do których stosowane są metody statystyczno-prognostyczne, które są przeznaczone do wymiany powinny dalej pracować [7]. Informacja o stanie podziemnych kabli energetycznych pomaga zaoszczędzić pokaźne sumy każdemu przedsiębiorstwu energetycznemu, które wydatkuje je z powodu awarii kabli oraz ich przedwczesnej i czasami nieuzasadnionej wymiany. Półautonomiczna platforma robota do inspekcji kabli w czasie rzeczywistym stosowanych przez przedsiębiorstwa dystrybucyjne pozwala gromadzić niezbędne informacje do prawidłowej oceny stanu kabli. Wzrost dokładności stosowanych czujników, zdolności przetwarzania informacji procesorów sygnałowych, rozwój systemów sterowania i komunikacji, teorii optymalizacji oraz

robotyki sprawia, że zdalny monitoring kabli podziemnych staje się interesującym rozwiązaniem.

Segmentowo-modułowa konfiguracja kolumnowa pozwala robotowi na przemieszczanie się wzdłuż kabli o średnicy od 4 do 8 cm oraz pokonywać przeszkody na swojej drodze. Robot może wykonywać zadania w trybie w pełni autonomicznym lub jako telesterowany dzięki połączeniu typu LAN lub przez Internet. Prototyp platformy został zaprojektowany i przetestowany na kablu dystrybucyjnym 14 kV.

Zrobotyzowana platforma składa się z 3 segmentów (z możliwością dalszej rozbudowy) sprzężonych 2 obrotowymi złączami. Segmenty zewnętrzne wyposażone są w parę serwosterowanych odnóży, które mogą objąć kabel i zwolnić uścisk, co pozwala na pokonywanie rozgałęzień kabla. Skrajne segmenty wyposażone są ponadto w czujniki podczerwone i akustyczne. Segment środkowy składa się z serwosterowanego koła napędowego zamontowanego na prostym podwoziu, elektroniki sterującej oraz baterii (rys. 8).

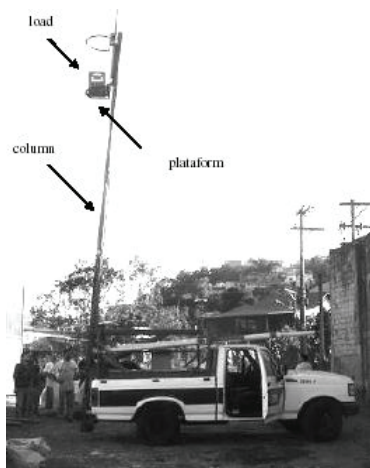


Rys.8. Prototyp platformy robota do badania kabli [7]

Zautomatyzowany wysięgnik do wymiany oświetlenia ulicznego (Brazylia)

W związku z dużymi kosztami robotów wykorzystywanych w USA i Japonii, wysoką specjalizacją wykonywanych przez nie zadań oraz mając na uwadze wymagania brazylijskiego Rządu dotyczące bezpieczeństwa wykonywania prac na wysokości oraz ograniczone środki finansowe, przedsiębiorstwo CPFL-Paulista we współpracy z Uniwersytetem w São Paulo stworzyło automatyczną platformę ułatwiającą dostęp do elementów oświetlenia ulicznego.

Na platformę składa się dwustopniowa kolumna teleskopowa zainstalowana na lekkiej półciągarówce (rys. 9). Przygotowanie do pracy obejmuje 2 etapy: podnoszenie konstrukcji oraz wjazd kosza z operatorem na wysokość. Sterowanie zapewnione jest dzięki zastosowaniu 2 sterowników PLC zainstalowanych na ciężarówce oraz na ruchomym koszu. Obsługa platformy jest możliwa zarówno z ziemi, jak i z kosza, a procedury bezpieczeństwa wymagają zapewnienia 2 osób do prac eksploatacyjnych. W skład systemu napędowego wchodzi 2 wciągarki, sterowane za pomocą prostych poleceń z panelów sterowniczych. Do głównych zalet platformy należy zaliczyć niewielką wagę w porównaniu z rozmiarami, możliwość zamontowania na lekkiej półciągarówce, łatwość obsługi i sterowania, duży poziom bezpieczeństwa pracy. Przyszłe udoskonalenia będą obejmowały wykorzystanie bardziej wytrzymałych i lżejszych materiałów, oraz poprawę dostępności elementów oświetlenia ulicznego przy niezmiennym pozycji samochodu.



Rys.9. Zautomatyzowany wysięgnik do wymiany oświetlenia ulicznego pod napięciem [8]

Sztuczna inteligencja wspiera robotykę

Roboty pozyskują wiedzę z otoczenia dzięki wykorzystaniu wszelkiego rodzaju czujników, systemów wizyjnych oraz kamer. Informacje pochodzące z otoczenia pozyskiwane przy wykorzystaniu ww. systemów stanowią informacje wejściowe, które następnie są przetwarzane i interpretowane przez oprogramowanie. Dzięki współpracy nowoczesnego oprogramowania i coraz doskonalszych urządzeń wykonujących polecenia tychże programów można mówić o inteligentnych maszynach. Z autonomizacją robota można wiązać jego inteligencję. Dla modelu robota można wyróżnić następujące rodzaje inteligencji, które w tabeli 2 porównano z odpowiednikami u człowieka:

Tabela 2. Porównanie wybranych rodzajów inteligencji u człowieka i robota [9]

Rodzaj inteligencji	
Człowiek	Robot
Logiczno-matematyczna	Języki programowania
Lingwistyczna	Wydawane sygnały, reakcja na komendy głosowe
Wizualno-przestrzenna	Kamery i systemy wizyjne, czujniki światła
Cielesno-kinetyczna	Silniki, żyroskopy, kamery, sonary, dalmierze, czujniki dotykowe

Do najczęściej stosowanych metod SI w robotach należą sztuczne sieci neuronowe, logika rozmyta oraz *Data Mining* (zgłębianie danych) [10]. Sztuczne sieci neuronowe stosowane są jako narzędzie wspomagające wyznaczanie trajektorii ruchu robotów, w sterownikach manipulatorów, lokalizatorach przeszkód, systemach wizyjnych, do identyfikacji obrazów (twarzy) i obiektów (sylwetek), detekcji ruchów z otoczenia, eliminacji szumów spowodowanych ruchem oraz odgłosów dochodzących z otoczenia. Do zastosowań logiki rozmytej w robotach należy zaliczyć m.in. sterowanie prędkością obrotową silników, pomijanie kamery i tym samym bazowanie na zdobytych wcześniej zdjęciach. Jedną z wydajnych metod wykorzystywanych wspomagających wykonywanie zadań przez roboty są metody *Data Mining*. Do metod tych należy zaliczyć identyfikację i klasyfikację obiektów widzianych okiem kamery (przy wykorzystaniu informacji statystycznych o cechach i klasach grup obiektów), podejmowanie decyzji (np. przy wykorzystaniu drzew decyzyjnych). W robotach coraz częściej wykorzystywane są mikrokontrolery zamiast układów logicznych i analogowych (ze względu na znacznie mniejszy pobór prądu i prostszą budowę). Najczęściej stosowane są mikrokontrolery z rodziny 8051 wykorzy-

stujące już nie tylko kompilatory języka Asembler, ale także języków wyższego rzędu takich jak C++, PASCAL czy też BASIC. W językach tych możliwe jest implementowanie rozwiązań z zakresu sieci neuronowych oraz logiki rozmytej. Jednym z przykładów możliwości zaimplementowania algorytmów logiki rozmytej w postaci sprzętowej jest zastosowanie jednostki decyzyjnej (*Decision Processor*) [11]. Oprócz zastosowań z zakresu SI, sterowanie prędkością obrotową silników stosowanych w robotach może odbywać się przy zastosowaniu modulacji szerokości impulsów. Realizacja sprzętowa tego rodzaju sterowania możliwa jest m.in. dzięki zastosowaniu procesorów sygnałowych DSP (*Digital Signal Processors*).

Podsumowanie

Pomimo znaczących kosztów wdrożenia robotów do prac w energetyce należy zauważyć, że jest to kierunek dynamicznie rozwijający się dzięki krajom o silnej gospodarce. Kraje te inwestują w technologię robotyzacji i ich współpracę z metodami SI i traktują roboty jako narzędzia wspomagające pracę i zwiększające bezpieczeństwo życia i zdrowia służb inspekcyjno-eksploatacyjnych a nie ich substytut. Rosnące wymagania dotyczące jakości i ciągłości zasilania wynikające z regulacji prawnych, rynku energii elektrycznej oraz nacisków odbiorców przygotowują znaczny obszar, w którym znakomicie mogą odnaleźć się w przyszłości inteligentne roboty. Dodatkowym motywatorem do nasilenia poszukiwań i badań nad robotyką powinna być planowana jądrowa przyszłość polskiej energetyki, i tylko od współpracy organów państwowych z przedsiębiorstwami energetycznymi i ośrodkami naukowymi zależy jej pomyślność.

LITERATURA

- [1] Dudek B., Robotyzacja w dziedzinie eksploatacji i diagnostyki elektroenergetycznej sieci przesyłowej, *Konf. EUI*, (2005), 1-6
- [2] Park Joon-Young, Cho Byung-Young, Byun Seung-Hyun, Development of Automatic Cleaning Robot for Live-line Insulators, *Konf. ESMO*, (2006), 1-7
- [3] Cho Byung-Hak, Byun Seung-Hyun, Park Joon-Young, Kim Jin-Seok, Development of Automatic Inspection Robot for Live-line Insulators, *Konf. ESMO 2006*, 1-5
- [4] Montambault S., Pouliot N., LineScout Technology: Development of an Inspection Robot Capable of Clearing Obstacles While Operating on a Live Line, *Konf. ESMO*, (2006), 1-8
- [5] Iwashita T., Noda S., Kawamura K., Nakashima M., A Study on the Development of an Operator-Assisted Distribution Work Robot, *Konf. ICOLIM 2004*, 13-19
- [6] Arata C. H., Prototype for works in TS 132-66-33 kV, *Konf. ICOLIM*, (2006), 1-12
- [7] Jiang B., Stuart P., Raymond M., Villa D., Mamishev A.V., Robotic Platform for Monitoring Underground Cable Systems, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, 2 (2002), 1105-1109,
- [8] Roncolato R. A., Romanelli N., W., Horikawa O., Hirakawa A., Amâncio S. M., Silvério M., Automatic elevator system for maintenance services, *Konf. ESMO*, (2006), 1-5
- [9] Dudek B., Czapaj R.: Roboty i sztuczna inteligencja w energetyce, *Energetyka 10/2006*, str. 731-738,
- [10] Czapaj R., Dudek B.: W zrobotyzowanym Luwrze sztuczna inteligencja jest Mona Liza, *Biuletyn miesięczny PSE S.A.* 7-8/2006, str. 37 – 42,
- [11] Ciesielski P., Sawoniewicz J., Szmigielski A.: Elementy robotyki mobilnej. *Wydawnictwo Polsko-Japońskie Wyższej Szkoły Technik Komputerowych*, Warszawa 2004,

Autorzy: mgr inż. Bogumił Dudek, EPC S.A., Biuro w Katowicach, ul. Jordana 25, 40-056 Katowice, E-mail: b.dudek@epc.pl;
mgr inż. Rafał Czapaj, EPC S.A., Biuro w Katowicach, ul. Jordana 25, 40-056 Katowice, E-mail: r.czapaj@epc.pl;