

napędy i sterowanie

**miesięcznik
naukowo-
-techniczny**

Nr 1 (261)

Rok XXIII
Styczeń 2021

ISSN 1507-7764
Indeks 36018X

Cena: 10,80 zł
(w tym 8% VAT)

*napędy • automatyka przemysłowa • energoelektronika • aparatura kontrolno-pomiarowa • mechatronika • systemy zasilające
układy zabezpieczeń • hydraulika • pneumatyka • robotyka • systemy transportowe • utrzymanie ruchu*

ENERGOELEKTRONIKA PRZYSZŁOŚCI



MARKEL
energoelektronika to nasza pasja



Numer, miesiąc wydania	Temat przewodni numeru	Uzupełnienie tematyki
1 (261) Styczeń	PRZEMYSŁ 4.0 TECHNOLOGIE 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Efektywność w górnictwie • Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne • Systemy mechatroniczne • Monitoring i systemy sterowania • Utrzymanie ruchu • Automatyzacja transportu szynowego • Efektywność w energetyce • Napędy • Oleje, środki smarne
2 (262) Luty	AUTOMATYZACJA PRODUKCJI EFEKTYWNOŚĆ W ENERGETYCE	<ul style="list-style-type: none"> • Bezpieczeństwo w przemyśle • Bezpieczeństwo sieci przemysłowych • Technika przemieszczeń liniowych i montażu • Hydraulika siłowa
3 (263) Marzec	AUTOMATYKA I ROBOTYKA	<ul style="list-style-type: none"> • Nowe technologie • Roboty przemysłowe • Termowizja • Aparatura kontrolno-pomiarowa • Systemy mechatroniczne
4 (264) Kwiecień	BEZPIECZEŃSTWO W PRZEMYŚLE	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulika w technice mobilnej • Sterowanie procesami • Efektywność energetyczna • Systemy transportowe • Wytwarzanie energii ze źródeł konwencjonalnych i odnawialnych • Maszyny i urządzenia dla wodociągów i kanalizacji • Przesył energii • Cyberbezpieczeństwo
5 (265) Maj	TERMOWIZJA, MONITORING, POMIARY	<ul style="list-style-type: none"> • Maszyny i napędy elektryczne • Technologie przyrostowe 3D • Napędy hybrydowe • Diagnostyka i kontrola urządzeń • Przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT – Industrial Internet of Things)
6 (266) Czerwiec	PRZEMYSŁ MASZYNOWY, INNOWACJE PRZEMYSŁ 4.0	<ul style="list-style-type: none"> • Termowizja, monitoring, układy regulacji • Inteligentny budynek • Robotyka • Oprogramowanie, sieci przemysłowe • Systemy informatyczne
7/8 (267/268) Lipiec/sierpień	SYSTEMY AUTOMATYZACJI W GÓRNICTWIE AUTOMATYZACJA TRANSPORTU SZYNOWEGO	<ul style="list-style-type: none"> • Cyfryzacja w ciągu produkcyjnym • Inteligentne układy zasilania, sterowania • Diagnostyka • Nowe technologie • Silniki elektryczne • Transformatory
9 (269) Wrzesień	AUTOMATYKA W ENERGETYCE AUTOMATYKA W PRZEMYŚLE SPOŻYWCZYM	<ul style="list-style-type: none"> • Efektywność w energetyce • Automatyka w przemyśle maszynowym • Układy regulacji automatycznej • Systemy transportowe • Maszyny i napędy elektryczne • Komponenty do produkcji oraz systemy dla przemysłu
10 (270) Październik	HYDRAULIKA, PNEUMATYKA I STEROWANIE PRZEMYSŁ 4.0	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnostyka • Inteligentne układy zasilania • Systemy mechatroniczne • Bezpieczeństwo w przemyśle • Napędy hybrydowe i elektryczne • Oleje, środki smarne • Energia odnawialna
11 (271) Listopad	AUTOMATYZACJA PRODUKCJI	<ul style="list-style-type: none"> • Maszyny i napędy elektryczne • Oprogramowanie, sieci przemysłowe • Technika przemieszczeń liniowych i montażu • Roboty przemysłowe • Sterowniki PLC i systemy sterowania • Systemy transportowe • Innowacje wod.-kan.
12 (272) Grudzień	CYFRYZACJA W PRZEMYŚLE AUTOMATYZACJA TRANSPORTU SZYNOWEGO	<ul style="list-style-type: none"> • Bezpieczeństwo w przemyśle • Systemy mechatroniczne • Napędy elektryczne i hydrauliczne • Inteligentny budynek • Cyberbezpieczeństwo

Adres redakcji:

47-400 Racibórz
ul. Środkowa 5
tel./fax 32 755 19 17
e-mail: redakcja.nis@drukart.pl; www.nis.com.pl

Redaktor naczelna: Katarzyna Zając
tel. 32 755 19 17 • e-mail: redakcja.nis@drukart.pl

Redaguje Zespół: Katarzyna Zając, Ludmiła Urbińska,
Ryszard Klencz

Redaktor statystyczny: Ludmiła Urbińska
tel./fax 32 755 23 23 • e-mail: nis@drukart.pl

Redakcja techniczna: Grzegorz Drobny
tel. 32 755 23 18 • e-mail: redakcja.tech@drukart.pl

Marketing:

- Aleksandra Misiewicz
tel./fax 32 755 18 23 • e-mail: marketing@drukart.pl
- Estera Krauze
tel./fax 32 755 18 23 • e-mail: marketing@drukart.pl
- Agnieszka Gutowska
tel./fax 32 755 24 55 • e-mail: marketing7@drukart.pl

Dział prenumerat: Norbert Klencz
tel./fax 32 755 15 74 • e-mail: prenumerata@drukart.pl

Podstawowa korekta tekstu: Marta Chamów

Rada Programowa:

- prof. zw. dr hab. inż. Waław Kolek - przewodniczący
- prof. nadzw. dr hab. inż. Andrzej Balawender
- prof. Marek Bergander
- prof. zw. dr hab. inż. Witold Byrski
- dr inż. Rafał Hein
- prof. inż. Jaroslav Homišin
- dr inż. Ryszard Jasiński
- prof. zw. dr hab. inż. Marek Jaszczuk
- prof. zw. dr hab. inż. Antoni Kalukiewicz
- dr hab. inż. Grzegorz Karoń
- prof. zw. dr hab. inż. Marian Piotr Kaźmierkowski
- prof. zw. dr hab. inż. Adam Klich
- dr hab. inż. Roman Krok
- prof. zw. dr hab. inż. Igor Piotr Kurytnik
- dr inż. Jacek Paraszczak
- prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Pawelski
- dr hab. inż. Krzysztof Pietruszewicz
- prof. zw. dr hab. inż. Stanisław Pirog
- prof. Jacek S. Stecki
- dr hab. inż. Michał Stosiak
- dr inż. Zbigniew Szulc
- prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz
- prof. zw. dr hab. inż. Edward Tomasiak
- dr inż. Grzegorz Wiciak

Redaktor tematyczny: prof. zw. dr hab. inż. Waław Kolek

Wydawca: Wydawnictwo Druk-Art SC
47-400 Racibórz, ul. Środkowa 5

Patronat honorowy:

Instytut Konstrukcji
i Eksploatacji Maszyn
Politechniki Wrocławskiej



Katedra Automatyki
i Inżynierii Biomedycznej
Akademii Górniczo-Hutniczej



Instytut Pojazdów, Konstrukcji
i Eksploatacji Maszyn
Politechniki Łódzkiej

Punktacja MNiSW za publikację naukowe wynosi 5 pkt (poz. 1652). Przyłączając się do realizacji idei Otwartej Nauki, udostępniamy bezpłatnie powierzchnię na artykuły naukowe publikowane w miesięczniku naukowo-technicznym „Napędy i Sterowanie”.

Redakcja nie odpowiada za treść ogłoszeń i nie zwraca materiałów niezamówionych. Zastrzegamy sobie prawo skracania i adiacji tekstów. Przedrukowywanie materiałów lub ich części tylko za zgodą pisemną redakcji. Redakcja deklaruje, że pierwotną wersją wydawanego miesięcznika „Napędy i Sterowanie” jest wersja drukowana (papierowa). „Wydarzenia” wybrano z materiałów prasowych firm.

Szanowni Państwo!

Przechodzący do historii stary rok zwykle skłania do refleksji nad tym, co zostawiamy za sobą. Wchodząc w nowy 2021 rok z pewną dozą ostrożności próbujemy popatrzeć w przyszłość, z nadzieją oczekując lepszego jutra. Z perspektywy czasu 2020 rok z pewnością nie zginie bowiem w mroku przeszłości, przede wszystkim przez fakt rozwoju epidemii COVID -19.

Nie ma dziś mediów, które w swych podsumowaniach – jak to zwykle na początku nowego roku bywa – nie opisywałyby trudnego okresu ostatniego roku. O tym, jak firmy faktycznie radziły sobie w minionym czasie dowiedzą się Państwo od ich przedstawicieli na łamach naszego pisma w kolejnych jego wydaniach.

Nadzieja na lepsze jutro, jakiego wszyscy z niecierpliwością oczekujemy, w tak newralgicznej sferze jaką jest przemysł, rodzi się powoli. Nie bez przyczyny za ten stan rzecz obwiniamy polityków, którzy nie potrafili właściwie zdiagnozować sytuacji gospodarczej i przywrócić jej na drogę rozwoju.

Decyzje o kolejnych lockdownach, ciągle zbyt mała ilość szczepionek – oddalają nieco ten moment, jednak cieszy fakt, że przedsiębiorcy dobrze znają swoją wartość, utwierdzając jednocześnie nas i siebie w przekonaniu, że polska gospodarka rozwija się dzięki ich zbiorowemu wysiłkowi. Praca wkładana w rozwój firm wymaga zaś sporej determinacji, biorąc pod uwagę nienadążające za postępem w sferze gospodarki rozwiązania prawno-administracyjne, a wśród nich m.in.: brak stabilizacji i uproszczeń w systemie podatkowym, brak wsparcia dla małych, początkujących przedsiębiorstw, zbyt mała promocja Polski za granicą czy też wciąż wysokie koszty pracy.

W nowym roku oczywiście życzę Państwu, aby wszystkie negatywne czynniki, które wstrzymują rozwój i ograniczają inicjatywę, zniknęły, ustępując miejsca działaniom umacniającym polską przedsiębiorczość.

W oczekiwaniu na zmiany zachęcam do lektury naszego pisma, w szczególności zaś do przeczytania publikacji: dr. inż. Roberta Rossy „Elektrowibratory z silnikami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi przeznaczone do przemysłowych napędów elektrowibracyjnych”; prof. dr. hab. Mariana A. Partyki i mgr inż. Marii Natorskiej „Decyzyjna optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba za pomocą nakładkowych drzew logicznych”; dr inż. Agnieszki Tiszbierek „Zastosowanie komputerowego wspomagania wyznaczania rangi ważności parametrów z funkcją zmienna zastępcza oraz warunkowość na rzeczywistym przykładzie ze zmiennymi zależnymi o podobnej ważności” oraz kolejnej części artykułu prof. dr. hab. inż. Ryszarda Tadeusiewicza „Archipelag sztucznej inteligencji – część II”.

Zachęcam do lektury
Katarzyna Zając
Redaktor naczelna





Str. 6

Przełączniki nadzorcze Finder gwarancją bezpieczeństwa w przemyśle



Str. 8

Elektronika napędowa dla każdego zastosowania



Str. 10

Nowe wymagania w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników asynchronicznych



Str. 13

Falownik serii SX1000 zasilający silnik wrzecionowy wysokoobrotowy 400 Hz



Str. 18

Archipelag sztucznej inteligencji. Część II

CO W NUMERZE

- 5 Nowości techniczne
- 85 Biblioteka

Nauka

- 18 Archipelag sztucznej inteligencji. Część II - R. Tadeusiewicz
- 28 Decyzyjna optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba za pomocą nakładkowych drzew logicznych - M.A. Partyka, M. Natorska
- 38 Zastosowanie komputerowego wspomaganie wyznaczania rangi ważności parametrów z funkcją zmienna zastępcza oraz warunkowość na rzeczywistym przykładzie ze zmiennymi zależnymi o podobnej ważności - A. Tiszbierek
- 48 Elektrowibratory z silnikami synchronicznymi wzbudzonymi magnesami trwałymi przeznaczone do przemysłowych napędów elektrowibracyjnych - R. Rossa
- 52 Utrzymanie ruchu w przemyśle. Wstęp - S. Szymaniec, M. Kacperak
- 63 Pojazdy autonomiczne. Wstęp - W. Choromański, I. Grabarek, M. Kozłowski, A. Czerepicki, K.A. Marczuk
- 66 Wybrane systemy transportu autonomicznego. Systemy PRT. Systemy torowe i ich ewolucja - W. Choromański, I. Grabarek, M. Kozłowski, A. Czerepicki, K.A. Marczuk
- 76 Współczesny elektryczny napęd trakcyjny. Przykłady elektrycznych napędów trakcyjnych - A. Dębowski

Technologie i produkty

- 6 Przełączniki nadzorcze Finder gwarancją bezpieczeństwa w przemyśle - FINDER Polska Sp. z o.o.
- 8 Elektronika napędowa dla każdego zastosowania - NORD Napędy Sp. z o.o.
- 10 Nowe wymagania w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników asynchronicznych - A. Owczarzy - CELMA INDUKTA S.A.
- 13 Falownik serii SX1000 zasilający silnik wrzecionowy wysokoobrotowy 400 Hz - J. Sobczak - SANYU Sobczak

Informacje branżowe

- 15 Międzynarodowe Targi Sprzętu Elektrycznego i Systemów Zabezpieczeń ELEKTROTECHNIKA 2021. Najnowsze rozwiązania w zakresie sprzętu elektrycznego, automatyki i systemów zabezpieczeń po raz dziewiętnasty w Warszawie!
- 16 Ostatnie środki na badania w szandarowym programie dla przedsiębiorców - A. Szymczak - MS-CONSULTING Klaudiusz Szymczak

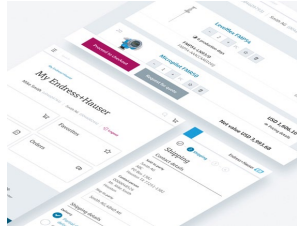
Indeks reklam

▷ ELEKTROTECHNIKA 2021.....	17	▷ MARKEL.....	1
▷ Endress+Hauser Polska.....	5	▷ MS-CONSULTING.....	16
▷ ENEX.....	37	▷ NORD Napędy.....	9
▷ FINDER Polska.....	7	▷ NOWIMEX.....	5, 33
▷ Grupa Cantoni.....	5, 11	▷ Robotyka.com.....	26
		▷ SANYU Sobczak.....	13
		▷ STAUFF Polska.....	35
		▷ Steinlen.....	27

NOWOŚCI TECHNICZNE

Zakupy online w Endress+Hauser – poznaj nowe udogodnienia

Wraz z wprowadzeniem nowej struktury segmentacji produktów FLEX, połączenia sklepu internetowego E-direct z endress.com oraz dalszej optymalizacji sekcji zakupów na stronie wyszukiwania i zamawianie produktów online będzie jeszcze prostsze.



– Łącząc sklepy E-direct oraz ten na stronie endress.com, ułatwiamy klientom współpracę z nami poprzez kanały cyfrowe – mówi Nikolaus Krüger, dyrektor ds. Sprzedaży w Grupie Endress+Hauser. Migracja klientów E-direct zakończyła się z końcem 2020 roku, dzięki czemu wszystko jest dostępne na jednej stronie internetowej, bez konieczności zmiany sklepów i kont.

W portalu klienta endress.com wprowadzono również nową segmentację produktów FLEX. Ta nowa funkcja uzupełnia istniejące opcje wyboru i dzieli portfolio przyrządów pomiarowych Endress+Hauser na cztery segmenty, w zależności od potrzeb klienta:

- Segment „Fundamental” obejmuje podstawowe produkty, które są łatwe w wyborze, instalacji i obsłudze.
 - „Lean” obejmuje niezawodne i solidne urządzenia, zaprojektowane do efektywnego zarządzania podstawowymi procesami.
 - „Extended” obejmuje wszystkie zaawansowane technologicznie urządzenia, służące do optymalizacji procesów.
 - „Xpert” obejmuje specjalistyczną aparaturę pomiarową, przeznaczoną dla wymagających aplikacji.
- FLEX ułatwia naszym klientom znalezienie odpowiedniego produktu dla ich indywidualnych potrzeb – mówi Nikolaus Krüger.

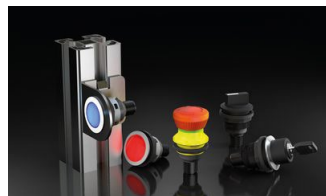
Endress+Hauser Polska Sp. z o.o.
www.pl.endress.com

SHORTRON Connect – mały i mocny

SHORTRON Connect odpowiada oczekiwaniom przemysłu na osprzęt M2M z przyłączem M12.

Georg Schlegel GmbH & Co. KG rozszerzył rodzinę produktów SHORTRON o kolejnego członka: oprócz standardowych przycisków z konwencjonalnymi przyłączami (nasuwki i śrubowe) oraz wersji z przyłączem M12 na przewodzie istnieje teraz też wariant z przyłączem M12 zintegrowanym z przyciskiem.

Podczas planowania projektów, oprócz kosztów, istotną rolę odgrywa także czas. SHORTRON Connect z bezpośrednim przyłączem M12 umożliwia prostą, szybką, a przede wszystkim pewną instalację urządzeń sterujących, ponieważ technologia M12 uniemożliwia zamianę lub złą polaryzację podłączenia – zgodnie



z zasadą *plug & work*: podłącz i pracuj. Co więcej, nie jest wymagany żaden dodatkowy element kontaktowy, ponieważ jest on już zintegrowany z przełącznikiem.

Użycie serii SHORTRON Connect eliminuje wymóg stosowania drogiej i kosztownej w montażu obudowy, ponieważ stopień ochrony IP65/IP67 gwarantuje niezawodną ochronę przed wodą i kurzem zarówno z przodu, jak i od tyłu. To pozwala zaoszczędzić nie tylko koszty, ale także miejsce, zwłaszcza gdy stosowane są ergonomiczne wsporniki montażowe SHORTRON Connect. Zostały one zaprojektowane z myślą o szybkim i łatwym montażu na profilach 40 mm. Za pomocą kątownika 90° do montażu pionowego, a także kątownika 135° do montażu poziomego, przełączniki można ustawiać i organizować zgodnie z potrzebami, a istniejące stanowiska operatora można łatwo rozbudowywać. W tym celu wsporniki montażowe są dostępne w trzech różnych wersjach, każda z 1, 2 lub 3 otworami montażowymi. Oczywiście można je też montować w dowolnych standardowych otworach 22 mm.

Nowimex SC
www.nowimex.com.pl

Nowa seria SIE200..315-K

Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom naszych Klientów, CELMA INDUKTA SA należąca do Grupy Cantoni opracowała nową konstrukcję silników jednobiegowych o podstawowej sprawności (oferowanych na rynkach zagranicznych bez wymagań w zakresie sprawności silników lub będących bazą do produkcji silników wykluczonych z wymagań sprawności) oraz silników wielobiegowych, która docelowo zastąpi serię 2Sg.



Konstrukcja mechaniczna ww. nowych silników spójna jest z produkowanymi seriami silników 2SIE, 3SIE i 4SIE, a więc cechuje się nowoczesnym designem kadłuba z bardziej efektywnym chłodzeniem oraz zmodyfikowanymi węzłami łożyskowymi, pozwalającymi na zwiększenie niezawodności silników.

Standardowo silniki nowej serii będą wyposażone w skrzynkę zaciskową na górze (analogicznie jak dla 2SIE, 3SIE i 4SIE), ale opcjonalnie dostępne będzie również wykonanie ze skrzynką z prawej lub lewej strony (jak w serii 2Sg).

Przy projektowaniu nowej serii silników uwzględniono jej zamienność montażową z serią 2Sg, co dodatkowo czyni ją wszechstronnym rozwiązaniem.

Na razie nowa seria jest dostępna w rozmiarze 200. Ostatecznie seria SIE całkowicie zastąpi stare silniki 2Sg (rozmiar ramy 200–315). Niemniej jednak stara seria nadal będzie dostępna do celów specjalnych.

Grupa Cantoni
www.cantonigroup.com

Przełączniki nadzorcze Finder gwarancją bezpieczeństwa w przemyśle

Przemysł rządzi się swoimi zasadami. Z jednej strony wymagane jest zapewnienie odpowiedniego bezpieczeństwa maszyn, z drugiej optymalizacja procesów i zmniejszanie kosztów produkcji, ryzyka awarii itd. Aby połączyć wszystkie aspekty i zapewnić poprawność działania linii automatycznych czy też zrobotyzowanych miejsc pracy w zakładach przemysłowych, należy już na etapie projektowania przewidzieć wiele kwestii. Finder, wychodząc naprzeciw normom i wymaganiom, zapewnia rozwiązania, które mogą zagwarantować zarówno bezpieczeństwo, jak i wygodę użytkownika urządzeń.

Poprawnie wykonana instalacja w obiekcie przemysłowym to niezodowny klucz do zachowania ciągłości produkcji i innych procesów. W większości zakładów produkcyjnych możemy spotkać instalacje wentylacyjne i odpylania. Ich sercem jest wentylator, który niejednokrotnie zapewnia obieg powietrza na hali, czy też daje możliwość zasysania pyłów. Elementem napędzającym wentylator jest silnik. Bardzo ważne jest zachowanie odpowiedniego kierunku wirowania, a co za tym idzie – poprawności kolejności faz. Nikt nie chciałby, żeby wentylator, który docelowo ma zasysać pył, zrobił to w sposób odwrotny, tłoczyc pył w drugą stronę i powodując, iż w pewnym momencie hala zrobiłaby się szara od pyłów, niejednokrotnie bardzo niezdrowych dla płuc człowieka. Rozwiązaniem w tej sytuacji jest zastosowanie nadzoru kolejności faz. Finder w swojej ofercie posiada przełącznik nadzorczy serii 70.41 oraz 70.42, gdzie jedną z głównych funkcji jest właśnie rotacja faz. W przypadku, gdy ktoś błędnie przełączy fazy albo będzie to niepożądana ingerencja w układ, przełącznik w zadanym czasie odłączy zasilanie. Idąc tym samym tropem, warto wspomnieć również o wypadnięciu jednej z faz – w konsekwencji silnik, pracując tylko na dwóch fazach, przy dłuższym czasie zostanie spalony i będzie wymagał przezwolenia. Aby tego uniknąć, przełącznik serii 70 posiada funkcję wypadnięcia fazy. Gdy takowa zaniknie, przełącznik niezwłocznie przerwie dopływ napięcia do silnika

i uchroni zakład produkcyjny od strat. Taka sama sytuacja będzie miała miejsce w momencie utraty przewodu neutralnego – nastąpi wyłączenie napędu. Sytuacja z wypadnięciem fazy czy też z jej utratą może mieć miejsce również w przepompowniach wody, gdzie docelowo pompa powinna zasysać wodę, a może zdarzyć się, że nagle zaczyna tłoczyć ją w odwrotnym kierunku.



W większości silników w uzwojeniach zabudowane są termistory PTC umożliwiające bezpośrednią kontrolę i ocenę warunków pracy silnika, co chroni przed możliwym przegrzaniem. Termistory są połączone szeregowo, a co za tym idzie – przy wzrastającej temperaturze co najmniej jednego czujnika ponad wartość znamionową wzrasta jego rezystancja, powodując rozwarcie się

zestyków w przełączniku. Finder oferuje przełącznik nadzorczy serii 71.91/71.92, umożliwiający właśnie nadzór temperatury z PTC czy nadzór nad zwarcieniem PTC. Pozytywna logika bezpieczeństwa przełącznika zabezpiecza nie tylko sam silnik, ale i wszystkie inne urządzenia powiązane, a w niektórych przypadkach również zdrowie ludzkie. Wszystkie przełączniki nadzorcze Finder posiadają certyfikaty CE oraz EAC.

Sytuacje opisane w artykule pokazują, jak ważna jest kontrola i zapobieganie awariom już na etapie projektowania zabezpieczeń. Gdy jednak zakład produkcyjny ma już gotowe instalacje, ich modernizacja również nie stanowi problemu. Zastosowanie przełączników nadzorczych Finder daje bezpieczeństwo i spokój w użytkowaniu urządzeń elektrycznych, a w obecnych czasach na tym zależy wszystkim. ■



FINDER Polska Sp. z o.o.

ul. Logistyczna 27

62-080 Sady

tel. 61 865 94 07

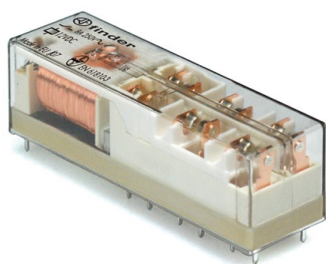
fax 61 865 94 26

e-mail: finder.pl@findernet.com

www.facebook.com/finderpolska/

Jeszcze bezpieczniej i wydajniej

Przełączniki modułowe i do obwodów drukowanych
z wymuszonym prowadzeniem styków do aplikacji bezpieczeństwa
Zgodne z EN 61810 Typ A (wcześniej EN 50205)



Seria 50
Przełącznik o niskim profilu z 4 lub 6 mechanicznie
sprzężonymi zestykami
Do montażu na płytach PCB



Seria 75
Do aplikacji
bezpieczeństwa
do poziomu SIL 3

 **finder**[®]
SWITCH TO THE FUTURE

FINDER Polska Sp. z o.o. ul. Logistyczna 27, 62-080 Sady
finder.pl@findernet.com findernet.com

Elektronika napędowa dla każdego zastosowania

Od ponad 30 lat NORD DRIVESYSTEMS opracowuje i produkuje elektroniczną technologię napędową, będąc jednym z pionierów innowacyjnych przetwornic częstotliwości. Portfolio obejmuje falowniki i rozruszniki silnikowe do 22 kW w wersjach zdecentralizowanych i do 160 kW dla szaf sterowniczych. Wszystkie produkty tej grupy charakteryzują się skalowalnymi funkcjami, wysoką precyzją regulacji, łatwą instalacją i obsługą. Różne klasy mocy, opcje montażu i moduły komunikacyjne zapewniają integrację ze wszystkimi architekturami sterowania.

Niezależnie od tego, czy jest to instalacja w szafie sterowniczej, czy zdecentralizowana wersja do użytku w terenie – dzięki rodzinie produktów NORDAC, firma NORD DRIVESYSTEMS oferuje technologię napędów elektronicznych do prawie każdego zastosowania. Przetwornice częstotliwości i rozruszniki silnika obejmują szeroki zakres mocy do 160 kW i imponują wysoką wydajnością i bezpieczeństwem. Warte zauważenia jest szeroka gama modułowych produktów do zdecentralizowanej elektroniki napędowej. Niezależnie od tego, czy są zamontowane na silniku, czy blisko silnika: dzięki mocy znamionowej do 22 kW i szerokiemu zakresowi funkcji zdecentralizowane napędy NORD są używane w wielu zastosowaniach na całym świecie – od przemysłu spożywczego, przez intralogistykę, po przeładunek towarów masowych.

Skalowalne funkcje dla każdego zastosowania napędu

Wszystkie falowniki NORD są skalowalne pod względem funkcji i konfiguracji oraz można je elastycznie dostosować do każdej aplikacji. Są szybkie w instalacji, łatwe w obsłudze i kompatybilne ze wszystkimi popularnymi systemami magistrali i sterowaniem. Przydatne funkcje, takie jak funkcjonalność PLC dla funkcji zintegrowanych z napędem, funkcja oszczędzania energii dla pracy z częściowym obciążeniem, sterowanie pozycjonowaniem POSICON, zintegrowane czopery hamowania do pracy w 4 kwadrantach i bezpieczeństwo funkcjonalne z STO i SS1, zapewniają wysoką



funkcjonalność użytkownika. Falowniki pracują w pętli otwartej lub zamkniętej i są przeznaczone do pracy z silnikami asynchronicznymi i synchronicznymi. Precyzyjne sterowanie wektorem prądu zapewnia optymalny moment obrotowy w różnych sytuacjach obciążenia i prędkości. Spójność całej rodziny produktów NORDAC zapewnia porównywalny zakres funkcji, jednolitą pracę i wspólne opcje dla wszystkich przetwornic częstotliwości NORD.

Monitorowanie stanu w celu konserwacji zapobiegawczej

Falowniki NORD mogą być wyposażone w rozwiązania do monitorowania stanu dla systemów konserwacji predykcyjnej i są dobrze wyposażone do użytku w IIoT i Przemysłu 4.0. Zintegrowany sterownik PLC może przetwarzać dane z podłączonych czujników i elementów wykonawczych, inicjować sekwencje sterowania i komunikować się z innymi elementami systemu. Okresowa lub ciągła rejestracja danych o napędzie i jego

stanie pozwala na wczesne wykrywanie i unikanie niedopuszczalnych stanów pracy. Nieplanowane przestoje można znacznie skrócić, a konserwacja zorientowana na stan (konserwacja predykcyjna) zastępuje konserwację opartą na czasie. Można planować przestoje maszyn i urządzeń.

Własna produkcja elektroniki w Niemczech

Przetwornice częstotliwości i rozruszniki silnika są produkowane w Aurich (Fryzja Wschodnia) w Dolnej Saksonii. NORD prowadzi własną produkcję elektroniki w Aurich od 1984 r., produkując ponad 100 000 jednostek rocznie na obszarze produkcyjnym 5000 m² – od urządzeń do produkcji seryjnej, poprzez indywidualnie konfigurowalne komponenty, po jednorazowe specjalne elementy konstrukcyjne. Specjalista od napędów opracowuje wszystkie rozwiązania wspólnie z klientami i idealnie dopasowuje je do indywidualnych wymagań.

Szkolenia

W siedzibie polskiego oddziału firmy w Zakrzowie, w ramach Akademii NORD, prowadzone są szkolenia z zakresu doboru, funkcjonowania i serwisu mechanicznych i elektronicznych systemów napędowych. Elektronika napędowa ma tutaj specjalną dedykowaną salę szkoleniową do praktycznych ćwiczeń z zakresu automatyki przemysłowej. W sali znajduje się 6 indywidualnych stanowisk szkoleniowych, które umożliwią szkolanym osobom połączenie poprzez komputer z falownikiem i jego parametryzację od podstaw, komunikację pomiędzy sterownikiem a falownikiem poprzez moduły sieciowe oraz komunikację między falownikami po sieci wewnętrznej.

O firmie

Zatrudniając ponad 4000 pracowników, NORD DRIVESYSTEMS opracowuje, produkuje i sprzedaje technologię napędów od 1965 roku i jest jednym z wiodących globalnych dostawców kompleksowych usług w branży. Oprócz standardowych napędów NORD dostarcza koncepcje i rozwiązania specyficzne dla aplikacji dla specjalnych wymagań, takich jak napędy energooszczędne lub systemy chronione przed wybuchem. W roku finansowym 2019 roczna sprzedaż wyniosła 750 mln euro. NORD posiada 51 filii w 36 krajach i dalszych partnerów handlowych w ponad 50 krajach. Zapewniają wsparcie techniczne,

lokalne magazyny, centra montażowe i obsługę klienta. NORD opracowuje i produkuje szeroką gamę rozwiązań napędowych dla ponad 100 branż, przekładnie dla momentów obrotowych od 10 Nm do ponad 282 kNm, dostarcza silniki elektryczne w zakresie mocy od 0,12 kW do 1000 kW i przemienniki częstotliwości do 160 kW. Rozwiązania inwerterowe są dostępne dla konwencjonalnych instalacji w szafach sterowniczych, jak również dla zdecentralizowanych, w pełni zintegrowanych jednostek napędowych. ■



NORD Napędy Sp. z o.o.
Zakrzów 414
32-003 Podłęże
tel. 12 288 99 00
fax 12 288 99 11
e-mail: biuro@nord.com
www.nord.com

reklama



MÓJ NAPĘD JEST PRODUKCJI NORD!

NOWY SILNIK IE5+

- Kolejny poziom energooszczędności: IE5+
- Kompaktowa i higieniczna konstrukcja
- Stała wysoka wydajność w całym zakresie regulacji

REDUKTOR + SILNIK + FALOWNIK = KOMPLETNY SYSTEM NAPĘDOWY

NORD Napędy sp. z o.o. | tel.: +48 12 288 99 00 | biuro@nord.com

nord.com

Nowe wymagania w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników asynchronicznych

Nowe wymagania w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników asynchronicznych wprowadzanych na rynek Unii Europejskiej – Rozporządzenie Komisji UE 2019/1781.

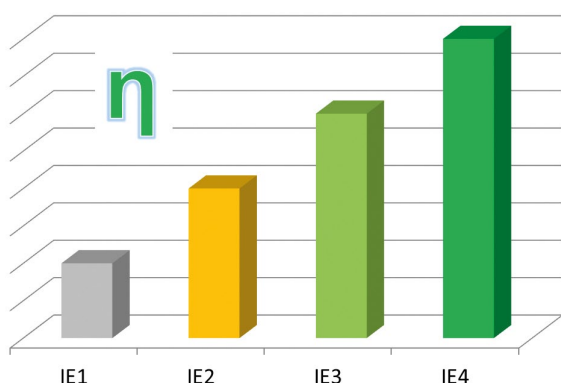
Rozwój szeroko pojętego przemysłu nie może odbywać się kosztem środowiska naturalnego. Liczne ograniczenia dotyczące emisji szkodliwych gazów, będących skutkiem ubocznym procesów wytwarzania energii (np. z węgla), są bodźcem do poszukiwania nowych źródeł energii (m.in. źródła odnawialne) oraz ulepszania aktualnie istniejących urządzeń i procesów przemysłowych w celu ograniczenia zużycia produkowanej energii. Dodatkowym czynnikiem determinującym ww. działania jest znaczący wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w stosunku do możliwości wytwórczych.

Około 50% energii elektrycznej wyprodukowanej w Polsce wykorzystywane jest przez układy napędowe z silnikami elektrycznymi. Z tego względu zastosowanie energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi o wysokiej sprawności może przynieść znaczące efekty w ograniczaniu ww. negatywnych skutków rozwoju naszego kraju przy jednoczesnym zapewnieniu wymiernych oszczędności dla użytkownika.

Klasy sprawności silników

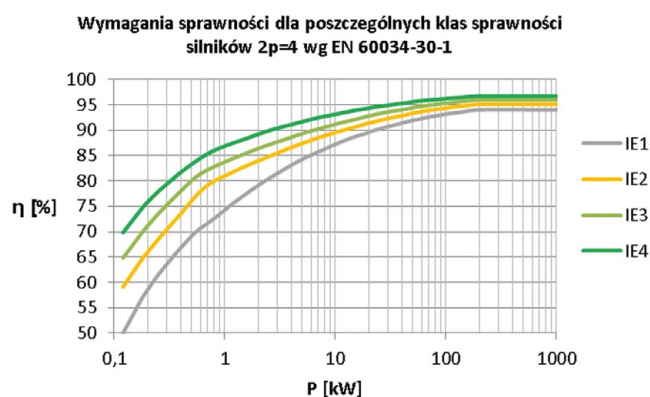
Podstawową wielkością określającą przewidywane oszczędności wynikające z zastosowania silnika energooszczędnego jest jego sprawność, która powiązana jest z klasą sprawności (rys. 1).

Na terenie Unii Europejskiej podział silników elektrycznych pod kątem sprawności odbywa się przy wykorzystaniu klasyfikacji IE (*International Efficiency*) wg normy EN 60034-30-1:2014 (rys. 1).



Rys. 1. Zależność pomiędzy sprawnością silników a klasami sprawności IE

Przyporządkowanie silnika do danej klasy sprawności następuje przez porównanie sprawności silnika wyznaczonej według ustalonej metody pomiaru (wg normy EN 60034-2-1:2007) z wymaganiami minimalnej sprawności dla danej klasy sprawności IE (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowe wymagania sprawności dla poszczególnych klas sprawności silników czterobiegunowych 2p=4 (sprawność wyznaczona wg normy EN 60034-2-1:2007)

Należy podkreślić, że norma EN 60034-30-1:2014, określająca klasy sprawności silników (IE) i powiązane z nimi minimalne wartości sprawności, jak wszystkie inne normy jest dokumentem do dobrowolnego stosowania – wymagania prawne (obligatoryjne) w zakresie minimalnego poziomu sprawności silników wprowadzanych na rynek UE określone są w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady oraz powiązanych z nią Rozporządzeniach.

Nowe rozporządzenie KE

W październiku 2019 roku Komisja Europejska opublikowała nowe Rozporządzenie 2019/1781 (uchylające dotychczasowe Rozporządzenia 640/2009 i 4/2014) dotyczące minimalnych sprawności silników elektrycznych oraz przemienników częstotliwości wprowadzanych na rynek UE. Przedmiotowe Rozporządzenie, związane z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE, nie tylko określa minimalne wartości sprawności i skojarzone z nimi klasy sprawności (zbieżne z klasami sprawności IE zdefiniowanymi w normie EN 60034-30-1:2014), ale również definiuje cechy silników, które podlegają pod to Rozporządzenie (istnieją pewne wykluczenia) – patrz tabela 1.

Nowe Rozporządzenie Komisji Europejskiej 2019/1781 wprowadza szereg zmian i stawia nowe wyzwania przed producentami silników elektrycznych oraz ich użytkownikami.

Najważniejsze z nich to wymaganie sprawności w klasie IE3 dla silników przeciwwybuchowych (z wyłączeniem silników przeznaczonych dla przemysłu górniczego), określenie minimalnej klasy sprawności IE4 dla silników o mocy od 75 kW do 200 kW oraz wprowadzenie poziomu IE3 również dla silników zasilanych z przetworników częstotliwości (wykluczenie możliwości wprowadzania na rynek silników w klasie sprawności IE2 do zasilania z przetworników częstotliwości) – szczegóły wymagań wraz z datami obowiązywania podano w tabeli 2.

Przedmiotowe Rozporządzenie UE 2019/1781 w zakresie minimalnego poziomu sprawności definiuje również wymagania dla Państw członkowskich odnośnie do weryfikacji

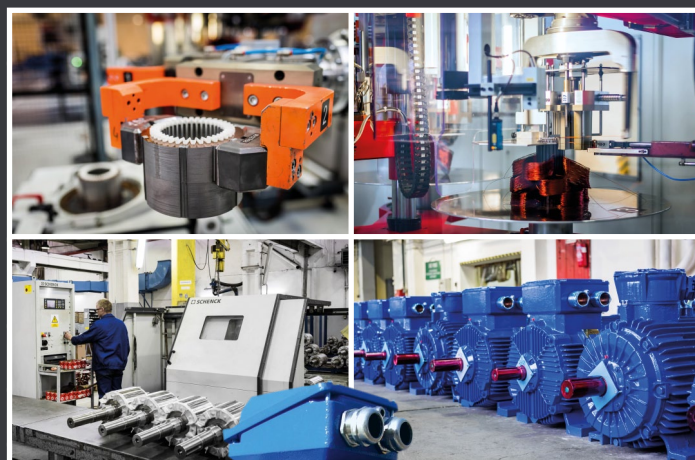
Tabela 1

Nowe Rozporządzenie UE 2019/1781 dotyczące minimalnej sprawności silników elektrycznych – zakres obowiązywania	
Rodzaje silników	<ul style="list-style-type: none"> ogólnego przeznaczenia z przekładnią wyposażone w zewnętrzny hamulec przeciwwybuchowe
Napięcie znamionowe	50÷1000 V
Częstotliwość znamionowa	50 Hz, 60 Hz lub 50 Hz/60 Hz
Zakres mocy	0,12÷1000 kW
Rodzaj pracy	S1, S3 ≥ 80%, S6 ≥ 80%
Liczba biegunów	2p=2, 4, 6, 8
Klasy sprawności	IE2 (wysoka) IE3 (premium) IE4 (superpremium)
Temperatura otoczenia	od -30 do 60°C
Temperatura wody chłodzącej (dla silników o chłodzeniu wodnym)	od 0 do 32°C
Wysokość zainstalowania	do 4000 m.n.p.m.
Silniki wyłączone z nowego Rozporządzenia	
<ul style="list-style-type: none"> wielobiegowe, pierścieniowe i z mechanicznymi komutatorami stanowiące integralną część produktu/urządzenia pod warunkiem, że sprawność silnika nie może być wyznaczona po wymontowaniu silnika z produktu/urządzenia z zabudowanym przetwornikiem częstotliwości pod warunkiem, że sprawność silnika nie może być wyznaczona z pominięciem przetwornika częstotliwości z zabudowanym hamulcem pod warunkiem, że hamulec stanowi integralną część konstrukcji silnika (jeżeli hamulec nie może być zdemontowany z silnika na czas badania jego sprawności) zasilane (zaprojektowane i przeznaczone do pracy przy pełnym zanurzeniu w cieczy) spełniające szczególne warunki dotyczące bezpieczeństwa obiektów jądrowych, zdefiniowane w art. 3 dyrektywy Rady 2009/71/EURATOM przeciwwybuchowe zaprojektowane i certyfikowane na potrzeby przemysłu górniczego w urządzeniach bezprzewodowych lub zasilanych za pomocą akumulatorów oraz w przenośnych urządzeniach sterowanych ręcznie, przenoszonych podczas działania w urządzeniach przystosowanych do obsługi ręcznej, których ciężar podczas działania jest podtrzymywany ręką w pełni zabudowane niewentylowane wprowadzone do obrotu przed dniem 2029-07-01 jako zamienniki identycznych silników stanowiących nieodłączną część produktów wprowadzonych do obrotu przed dniem 2022-07-01, wprowadzane do obrotu specjalnie w tym celu zaprojektowane specjalnie na potrzeby elektrycznych pojazdów trakcyjnych 	

Cantoni[®]

GROUP

DRIVING YOUR BUSINESS



Oferujemy silniki
energooszczędne **klasy IE3**
oraz pełny zakres mocy
silników dla przemysłu
od 0,04kW do 6000kW



www.cantonigroup.com

Tabela 2. Harmonogram wdrożenia nowych wymogów w zakresie sprawności silników

Typ silnika	Wymagana klasa sprawności	Silniki ogólnego przeznaczenia	Silniki przeciwybuchowe z wyłączeniem silników dla przemysłu górniczego	
			Budowy wzmocnionej (Ex eb)	Pozostałe
3-fazowy	IE2	2p=2, 4, 6, 8 & 0,12 ÷ <0,75 kW	2p=2, 4, 6, 8 & 0,12÷1000 kW	nie dotyczy
		od 2021-07-01	od 2023-07-01	
	IE3	2p=2, 4, 6, 8 & 0,75÷1000 kW	nie dotyczy	2p=2, 4, 6, 8 & 0,75÷1000 kW
		od 2021-07-01		od 2021-07-01
	IE4	2p=2, 4, 6 & 75÷200 kW	nie dotyczy	nie dotyczy
		od 2023-07-01		
1-fazowy	IE2	≥0,12 kW		
		od 2023-07-01		

efektywności energetycznej silników dostępnych na rynku oraz wytyczne dla producentów w kwestii dokumentacji technicznej dołączanej do silników.

Pełny tekst przedmiotowej Regulacji dostępny jest na stronie Komisji Europejskiej (<http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj>).

Na podstawie analiz przeprowadzonych przez Komisję Europejską szacuje się, że przedmiotowe nowe wymagania w zakresie sprawności silników (określone w nowym Rozporządzeniu) przyczynią się do ograniczenia rocznego zużycia energii elektrycznej o około 10 TWh oraz do zmniejszenia rocznej emisji gazów cieplarnianych o 3 Mt ekwiwalentu dwutlenku węgla do roku 2030.

 mgr inż. Adam Owczarzy – CELMA INDUKTA S.A., Dział Rozwoju



www.cantonigroup.com

WYDARZENIA

● Jak policzyć zwrot z inwestycji w cyfryzację?

Wraz z rozwojem firmy pojawia się wiele procesów, które wymagają optymalizacji i automatyzacji. Jeśli firma chce z sukcesem konkurować i walczyć o klienta, musi zainwestować w digitalizację. Identyfikacja wąskich gardeł i dobór odpowiednich narzędzi pozwala zwiększyć efektywność, podnieść produktywność pracowników i poprawić jakość wytwarzanych produktów. Jednak zanim zainwestujemy czas i pieniądze w konkretne rozwiązania IT, należy policzyć oczekiwany zwrot z poniesionych nakładów.

- Wybór właściwych narzędzi procesu cyfryzacji w firmie powinien podlegać precyzyjnej ocenie finansowej.
- Cyfryzacja zrealizowana silosowo może powodować spowolnienie funkcjonowania procesów.
- Brak identyfikacji wąskich gardeł wprowadza ryzyko strat wynikających z nierównomiernego działania procesów w firmie.
- Cyfryzacja jest procesem wieloetapowym i wymaga konsekwentnych działań realizowanych wedle szczegółowo przygotowanej strategii i taktyki. Istnieje wiele powodów, dla których firmy decydują się na digitalizację procesów, czyli wprowadzenie nowych

systemów informatycznych. Wśród nich można wymienić m.in. poprawę efektywności projektowania i komfortu pracy inżyniera, konieczność przyspieszenia procesu projektowego i redukcję liczby błędów, ograniczenie kosztów produkcji, optymalizację łańcucha dostaw aż po potrzebę zmniejszenia zaangażowania siły ludzkiej w tworzenie dokumentacji.

Biznes wymaga, aby każda inwestycja krótko- i długoterminowo zwróciła się w okresie Cyklu Życia Produktu, dlatego wybór właściwych rozwiązań optymalizujących procesy w firmie powinien podlegać precyzyjnej ocenie finansowej. Powstaje zatem pytanie, jakie czynniki uwzględnić, podejmując decyzję o zakupie oprogramowania.

Kluczowym parametrem mierzącym, w jakim stopniu dana inwestycja była opłacalna, jest wskaźnik rentowności (z ang. „ROI” *return on investment*, czyli zwrot z inwestycji). Inaczej mówiąc, jest to stosunek opodatkowanego zysku operacyjnego do całkowitych nakładów inwestycyjnych wyrażony w procentach.

Istnieje kilka czynników, dzięki którym współczynnik ROI może się zwiększyć: gdy produkty są bardziej innowacyjne, gdy podlegają częstej zmienności, gdy maleją koszty operacyjne lub gdy kapitał stały maleje.

Ocenę planu inwestycyjnego, pozwalającą na określenie wartości zysku w danym okresie, a także czasu, po jakim zysk będzie większy od inwestycji, można dokonać za pomocą metody NPV (*net present value*), która polega na dyskontowaniu przyszłych strumieni pieniężnych do ich wartości obecnych. Należy pamiętać, aby pod uwagę wziąć wszystkie inwestycje związane z wprowadzeniem produktu, które mogą być rozłożone na lata, takie jak koszt szkoleń, komputerów czy zaawansowanego wsparcia technicznego produktu.

Skąd możemy czerpać przychód, inwestując w cyfryzację? Możliwych potencjalnych źródeł przychodu jest wiele, a wśród nich należałoby wymienić: innowacje produktowe, możliwość skrócenia procesu ofertowego, poprawę jakości, elastyczności produkcji i dostaw czy ograniczenie strat wynikających z błędów ludzkich. Cyfryzacja procesów w firmie w znaczącym stopniu może wpłynąć także na zmniejszenie kosztów operacyjnych, generując oszczędności wynikające ze zmniejszenia prac przygotowawczych bądź bezproduktywnych.

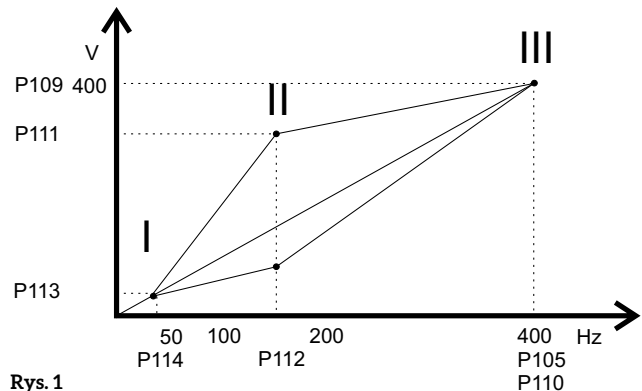
Źródło: Autodesk

Falownik serii SX1000 zasilający silnik wrzecionowy wysokoobrotowy 400 Hz

Jerzy Sobczak

W roku 2015 firma Sanyu Sp. j. wprowadziła nowy produkt. Jest nim przemiennik częstotliwości serii SX1000. Poświęciliśmy już wiele artykułów opisujących właściwości tego falownika na łamach miesięcznika „Napędy i Sterowanie”. Doczekał się on już w 2020 roku nowej wersji nazwanej SX1000PLUS. Warto jednak przypomnieć, że reprezentuje on nową generację wysokiej jakości wielofunkcyjnych, ekonomicznych i tanich przemienników częstotliwości. Przemiennik częstotliwości SX1000PLUS jest energooszczędnym przemiennikiem skalarnym, zasilanym jedno- lub trójfazowo, produkowanym obecnie do mocy 37 kW. Energooszczędny (funkcja *energy-saving*), prosty i tani falownik serii SX1000PLUS został bardzo dobrze przyjęty przez rynek i klientów. Znajduje on szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu.

Ostatnio falownik ten znalazł zastosowanie jako zasilacz dla silników asynchronicznych wysokoobrotowych, często wykorzystywanych jako silniki wrzecionowe. Silnik wrzeciona odpowiada za prawidłowe parametry pracy narzędzia w procesie skrawania. To, jaką prędkość dobrać do procesu skrawania, zależy od materiału, jaki będzie poddawany obróbce. Na co szczególnie zwrócić uwagę? Na moment obrotowy, moc oraz prędkość obrotową. Dobra znajomość zależności między tymi trzema parametrami może być bardzo pomocna również przy doborze odpowiedniego falownika.



Rys. 1

Dwie zasadnicze grupy silników elektrycznych wrzecionowych to synchroniczne i asynchroniczne silniki wrzecionowe. Firma Sanyu proponuje swoje falowniki do asynchronicznych silników wrzecionowych. W przypadku asynchronicznych silników wrzecionowych niskoobrotowych (do 2800 obr./min) proponujemy serię falowników wektorowych SX2000. W przypadku silników wrzecionowych wysokoobrotowych (do 24000 obr./min) idealne są falowniki serii SX1000PLUS. Silniki wysokoobrotowe bazują na pracy z podwyższoną częstotliwością. Falowniki SX1000PLUS można w szybki sposób przystosować do współpracy z takimi silnikami.

reklama



kupuj
on-line
sanyu.eu/sklep

+48 32 345 20 20
info@sanyu.eu
www.sanyu.eu



SANYU.eu
falowniki • softstarty



Testowane i Serwisowane w Polsce
+48 606 945 936



OSZCZĘDŹ ŚRODOWISKO I TWOJE PIENIĄDZE
ECO-MONEY SAVING



od 2013 r.
SANYU.eu
na polskim rynku



Rys. 2. Silnik wrzecionowy

Np. silnik MT1090 włoskiej firmy HSD Mechatronic Division ma następujące parametry: $U_n = 3 \times 380 \text{ V}$, $I_n = 7,4 \text{ A}$, $f_n = 400 \text{ Hz}$, $n_n = 24000 \text{ obr./min}$. Aby ten silnik zasilać z falownika, należy zwiększyć częstotliwość maksymalną falownika SX1000-5R5G-4 (P105 na wartość 400 Hz) oraz zmienić charakterystykę przyrostu napięcia wyjściowego w funkcji

częstotliwości (P110-400 Hz). W większości przypadków ten zabieg jest wystarczający. Zdarzają się jednak silniki, w których falownik podczas uruchomienia wyrzuca błąd: OC1 – przeciążenie prądowe podczas przyspieszania. W falowniku SX1000PLUS mamy możliwość kształtowania charakterystyki U/f w 3 punktach bazowych. W takim przypadku dodatkowo musimy ustawić pozostałe 2 punkty charakterystyki (rysunek 1). W zależności od rodzaju pracy stosujemy charakterystykę z podwyższonym, stałym lub obniżonym momentem rozruchowym.

Kompaktowa obudowa, system montażu, nawiązuje do obecnych na rynku produktów. Więcej informacji na temat falowników serii SX1000PLUS uzyskają Państwo na naszej stronie www.sanyu.eu.

 Jerzy Sobczak

SANYU.eu[®]
falowniki • softstarty

WYDARZENIA

● W jaki sposób jednorazowy charakter technologii naraża dane biznesowe na ryzyko?

Ciągłe podążanie za najnowszymi trendami technologicznymi stało się powszechnie stosowaną praktyką. Technologia w coraz większym stopniu staje się częścią naszego codziennego życia, dlatego okres eksploatacji naszych urządzeń jest coraz krótszy. Stanowi to spory problem z uwagi na ogromną ilość danych przechowywanych na urządzeniach. Wraz ze skracaniem się cyklu życia technologii wiele osób pozbywa się swoich starych urządzeń m.in. w komisażach i sprzedaje je nowym właścicielom, nie myśląc o danych i informacjach osobistych, które wciąż się na nich znajdują.

Co więcej, w obecnych czasach wiele osób pracuje w domu i wykorzystuje prywatne komputery do celów zawodowych. Sprawia to, że kontrolowanie danych i zarządzanie nimi w organizacji staje się prawie niemożliwe. W związku z tym, że dane są dziś obecne zarówno na urządzeniach firmowych, jak i osobistych, nie mamy nad nimi żadnej kontroli – zwłaszcza gdy urządzenie trafia do komisju, jest sprzedawane lub wyrzucane.

Trendy panujące w miejscach pracy, takie jak BYOD, zyskują na popularności i utrudniają organizacjom śledzenie danych. Zespoły ds. IT mają mniejszą kontrolę nad urządzeniami osobistymi

pracowników, dlatego ochrona przechowywanych na nich danych staje się wyzwaniem. Problemy takie, jak brak szyfrowania lub przestarzałe systemy operacyjne, mogą prowadzić do naruszenia zabezpieczeń i utraty danych.

Organizacje muszą brać to zagadnienie pod uwagę podczas wdrażania strategii cyberbezpieczeństwa. Oznacza to konieczność kształcenia pracowników w dziedzinie zagrożeń związanych z pozbywaniem się starych urządzeń oraz ustanawiania odpowiednich zabezpieczeń w obrębie organizacji.

Pierwszym krokiem na drodze do skutecznego zarządzania jest przeszkolenie pracowników przez zespoły ds. IT w zakresie ryzyka związanego z używaniem urządzeń osobistych do celów służbowych, a następnie ich wyrzucaniem. Pracownicy powinni przejść szkolenie na temat procedur bezpieczeństwa stosowanych w danej organizacji, a także zrozumieć, jak przekładają się one na urządzenia osobiste.

Częścią tego procesu powinno być kształcenie w zakresie prawidłowego usuwania zawartości telefonu w przypadku jego oddania np. do komisju. Zagadnienie to nie jest brane pod uwagę przez większość organizacji, jednak należy zwrócić na nie uwagę.

Pracownikom należy też przekazać wiedzę na temat tego, jak rozpoznać potencjalne próby *phishingu* oraz

ataki szkodliwego oprogramowania i ransomware na ich urządzenia osobiste. Zdolność do identyfikowania takich ataków pozwoli zmniejszyć ryzyko utraty danych.

Jeżeli jednak szkolenie pracowników zawiedzie, istnieją pewne środki ochrony, które zespoły ds. IT mogą wdrożyć ręcznie, aby jeszcze bardziej ograniczyć ryzyko (ciągłe aktualizacje oprogramowania, bezpieczeństwo haseł, szyfrowanie danych w celu ich ochrony, czyszczenie wszystkich danych z telefonu).

W tym roku praca z domu stała się dla wielu osób nową codziennością, dlatego zarządzanie rozprzestrzenianiem się danych firmy staje się coraz bardziej skomplikowane. Mimo iż samo wdrożenie trendów pozwalających na elastyczne wykonywanie pracy było planowane na następne 5–10 lat, organizacje nie były przygotowane na to, że zjawisko to stanie się tak powszechne w 2020 r. Co więcej, wszystko wskazuje na to, że w przyszłości będzie się ono jeszcze bardziej nasilać.

Ważne jest, aby zespoły ds. IT rozumiły wszystkie zagrożenia związane z wdrażaniem coraz bardziej elastycznych form wykonywania pracy w nadchodzących latach. Dużą część tego procesu stanowi, rzecz jasna, zrozumienie ryzyka związanego z korzystaniem z urządzeń osobistych.

Źródło: Veeam

Międzynarodowe Targi Sprzętu Elektrycznego
i Systemów Zabezpieczeń ELEKTROTECHNIKA 2021

Najnowsze rozwiązania w zakresie sprzętu elektrycznego, automatyki i systemów zabezpieczeń po raz dziewiętnasty w Warszawie!

To będzie wielkie wydarzenie, najważniejsze wydarzenie w branży roku 2021.

Targi ELEKTROTECHNIKA 2021, Targi ŚWIATŁO 2021 i Targi AUTOMATICON 2021 odbędą się w jednym miejscu i w jednym czasie – tj. w dniach 19–21 maja 2021 roku na terenie EXPO XXI w Warszawie. Organizacja tych trzech imprez w jednym miejscu i czasie da możliwość spotkania się wszystkim związanym z branżą elektrotechniczną, teletechniczną, elektroniczną i oświetleniową oraz aktywnego włączenia się w towarzyszący Targom program konferencyjno-szkoleniowy.

Spotkania skierowane są do projektantów, wykonawców, inspektorów nadzoru, producentów, instalatorów, służb eksploatacji operatorów energetycznych, audytorów energetycznych, kadry zarządzającej, służb eksploatacji i utrzymania ruchu w różnego rodzaju zakładach i spółdzielniach produkcyjnych, przedsiębiorców, pracowników urzędów gmin (miast) i starostw powiatowych, zarządców obiektów komunalnych, służb eksploatacji obiektów biurowych oraz obiektów magazynowych i centrów logistycznych, przedstawicieli działów inwestycji, przedstawicieli działów technicznych i bhp, przedstawicieli placówek oświatowych, przedstawicieli eksploratorów obiektów służby zdrowia, kierowników obiektów sportowych, deweloperów oraz studentów kierunków elektrotechnicznych.



Na terenie Targów ELEKTROTECHNIKA 2021 powstaną dodatkowe specjalne strefy: OZE, INSTALACJI ODGROMOWYCH I PRZECIWPRIĘCIOWYCH, ELEKTROMOBILNOŚCI, AUTOMATYKI, INNOWACJI I WYNAŁAZKÓW oraz TELETECHNIKI.

Na terenie Targów ŚWIATŁO 2021 powstanie specjalna Strefa OŚWIETLENIA TERENÓW PUBLICZNYCH oraz Strefa WNEŹTRZE OTWARTE poświęcona zieleni i naturze w połączeniu z automatyką i smart technologiami.

19 maja odbędzie się spotkanie Jednostek Samorządu Terytorialnego poświęcone gospodarce energetycznej w zakresie oświetlenia, OZE i elektromobilności na terenie miast i gmin.

Zorganizowany zostanie również Dzień Mazowieckiego Inżyniera Budownictwa.

Targi w Warszawie to nie tylko wystawa, ale też płaszczyzna kontaktów, innowacji i kreatywnych działań na styku producent – odbiorca. Taka formuła stwarza nowe możliwości zarówno dla producentów produktów i innowacyjnych rozwiązań, jak i ich odbiorców. To tutaj odwiedzający znajdą niezbędne informacje i inspiracje do realizacji nowych projektów oraz niezbędnych działań modernizacyjnych. ■

Szczegółowe informacje na temat nadchodzącej edycji Targów można uzyskać na stronie www.elektroinstalacje.pl

Kontakt: office@elektroinstalacje.pl

Ostatnie środki na badania w sztandarowym programie dla przedsiębiorców

Anna Szymczak

W marcu 2021 roku pojawi się ostania szansa na pozyskanie środków na prowadzenie badań w przedsiębiorstwach. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju rozpocznie nabór wniosków w ramach tzw. programu „Szybka ścieżka”. Do podziału jest 300 mln zł. Będzie to już ostania szansa na środki w ramach tego popularnego programu.

Każda firma w kraju, która prowadzi badania, zna już chyba program „Szybka ścieżka”. Pod tą nazwą kryje się podziałanie 1.1.1 „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa” w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014–2020. Konkurs i jego warunki będą ogłoszone 15 lutego 2021 roku, a zbieranie wniosków będzie trwało od 22 marca 2021 r. do 4 maja 2021 r. Konkurs będzie podzielony na odrębne rundy dla dużych oraz mikro-, małych i średnich (MSP) firm.

Skuteczne pozyskanie środków uzależnione jest od kilku czynników, z których najważniejsze to:

- adekwatny zespół badawczy;
- zakres projektu podzielony na etapy;
- nowość rezultatów w skali kraju.

Po pierwsze – adekwatny zespół badawczy

Kwestia doboru osób do zespołu badawczego jest jedną z najważniejszych i najtrudniejszych kwestii dla projektów badawczych, bo doświadczenie kadry w działalności biznesowej nie oznacza automatycznie wysokich kompetencji w prowadzeniu projektów badawczych.

W każdym projekcie badawczym należy wskazać we wniosku o dofinansowanie, że kluczowy personel zaangażowany w realizację projektu posiada doświadczenie adekwatne do zakresu i rodzaju zaplanowanych prac, w tym w realizacji projektów obejmujących prace B+R.

Wnioskodawca musi posiadać wszystkie kluczowe zasoby osobowe już na etapie składania wniosku o dofinansowanie.

Jeśli w firmie są osoby z takim doświadczeniem, to warunek jest spełniony, ale jeśli ich nie ma, to należy zadbać o pozyskanie właściwych osób. W tym celu można skorzystać z różnych rozwiązań warunkowych, np. umów warunkowych o współpracy (promesy zatrudnienia/ umowy przedwstępnej). Taka umowa wejdzie w życie pod warunkiem podpisania umowy o dofinansowanie. Jeśli wniosek nie będzie oceniony pozytywnie – pracodawca nie musi zatrudniać personelu badawczego.

Wnioskodawca – zamiast zatrudniać u siebie nowy personel badawczy – może powierzyć realizację części prac B+R w projekcie podwykonawcy. W takim przypadku weryfikacji podlega, czy Wnioskodawca wykazał potencjał kadrowy podwykonawcy albo wymagania co do potencjału kadrowego (w przypadku braku wyboru podwykonawcy na etapie wnioskowania).

W przypadku, gdy prace B+R powierzone podwykonawcy mają kluczowy charakter, wybór podwykonawcy musi być zakończony przed złożeniem wniosku o dofinansowanie, przynajmniej w zakresie etapu kończącego się pierwszym kamieniem milowym, a Wnioskodawca ma obowiązek posiadania umowy warunkowej z danym podwykonawcą.

Po drugie – etapy prac B+R

Kolejnym kluczowym zagadnieniem w każdym projekcie badawczym jest właściwe zidentyfikowanie problemu badawczego projektu, który musi być precyzyjnie określony w kontekście wskazanej potrzeby społecznej/gospodarczej/rynkowej.

Zaplanowane prace B+R muszą być podzielone na jasno sprecyzowane i układające się w logiczną całość etapy, a każdy etap musi mieć wskazany precyzyjnie (w sposób mierzalny) efekt końcowy (kamień milowy), np. na etapie powstawania prototypu należy doprecyzować jego pożądane parametry, np. minimalna wydajność, moc itp.

Po trzecie – nowość rezultatów projektu – minimum w skali kraju

W ramach projektów badawczych mogą być dofinansowane wyłącznie projekty, których rezultat:

1. stanowi **innowację produktową lub procesową** oraz
2. charakteryzuje się **nowością co najmniej w skali polskiego rynku**, w kontekście posiadanych przez niego nowych cech, funkcjonalności w porównaniu do rozwiązań dostępnych na rynku.

Tak więc zakres projektu musi wyraźnie wskazywać na występowanie innowacji w projekcie badawczym.

Priorytetem w programach NCBR jest wspieranie powstania innowacyjnych produktów/technologii/usług, które nie są jeszcze dostępne na polskim rynku, lub też takich, które są dostępne, ale opracowywane produkty oferują nowe, innowacyjne funkcjonalności co najmniej w skali polskiego rynku.

Kryteriów oceny jest więcej, ale te wskazane powyżej stanowią zazwyczaj największe wyzwanie dla przedsiębiorstw podczas przygotowania pierwszych projektów badawczych. Warto zwrócić uwagę, że warunki programu dopuszczają umowy warunkowe czy takie

Sposób oceny innowacji w programie „Szybka ścieżka”

Innowacja produktowa	Nowość rezultatów projektu (co najmniej w skali polskiego rynku) jest rozumiana jako znacząca zmiana, tzn. podczas oceny wniosku o dotację brane pod uwagę będą wskaźniki jakościowe i ilościowe, które odróżniają ten produkt od występujących na rynku produktów o podobnej funkcji podstawowej.
Innowacja procesowa	Nowość rezultatów projektu rozumiana jest jako wprowadzenie zmian technologicznych (co najmniej w skali polskiego rynku). W ramach oceny kryterium weryfikacji podlegać będzie, czy technologia wykorzystana w procesie stanowi nowość w skali polskiego rynku oraz czy mamy do czynienia ze znaczącą zmianą w zakresie technologii, urządzeń oraz/lub oprogramowania.

Źródło: Kryteria wyboru operacji finansowanych w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020, Poddziałanie 1.1.1. Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa, styczeń 2019 r.

zaplanowanie zasobów czy wydatków, że jeśli projekt badawczy nie uzyska dotacji, to przedsiębiorca może się wycofać ze zobowiązań i nie musi ponosić kosztów na zatrudnienie czy podzlecenie prac B+R. Program „Szybka ścieżka” cieszył się w każdej edycji dużym zainteresowaniem. Wybuch pandemii nie wpłynął na obniżenie zainteresowania i teraz przed nami ostaną szansa na środki na sfinansowanie do 90% poniesionych kosztów w projekcie.

- Alokacja: 300 mln zł.
- Ogłoszenie konkursu: 15 lutego 2021 r.
- Rozpoczęcie naboru wniosków: 22 marca 2021 r.
- Zakończenie naboru wniosków: 4 maja 2021 r.
- Konkurs podzielony na rundy (dla dużych przedsiębiorstw i MŚP).
- Konkurs dla regionów słabiej rozwiniętych.

Anna Szymczak
MS-Consulting Klaudiusz Szymczak



MS-CONSULTING
ul. Warszawska 43
61-028 Poznań
tel. 61 826 61 30
fax 61 624 77 76
www.ms-consulting.pl

reklama

19 Międzynarodowe Targi
Sprzętu Elektrycznego i Systemów Zabezpieczeń

19 - 21 maja 2021
Warszawa



ELEKTROTECHNIKA
international trade show

SPECJALNE STREFY:

- Instalacji odgromowych i przeciwprzepięciowych
- Innowacji i wynalazków
- Elektromobilności
- OZE
- Automatyki
- Teletechniki

www.elektroinstalacje.pl

Targi Elektrotechnika 2021

3 imprezy - 1 miejsce - 1 data

Targi Elektrotechnika
Targi Światło
Targi Automaticon

EXPO XX, Prądyńskiego 12/14, Warszawa



Archipelag sztucznej inteligencji. Część II

Ryszard Tadeusiewicz

Wprowadzenie

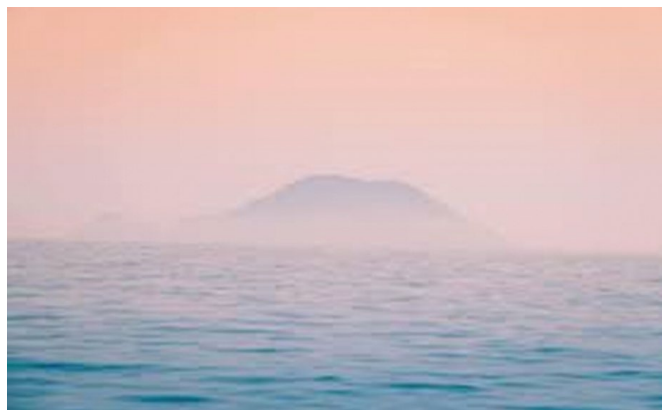
W poprzednim numerze miesięcznika „Napędy i Sterowanie” zdefiniowałem, czym w istocie jest sztuczna inteligencja, oraz wyjaśniłem, dlaczego sztuczną inteligencję porównuję do archipelagu wysp. Dodatkowo w tym poprzednim artykule omówiłem już trzy wyspy tego archipelagu. Te trzy już omówione wyspy to kolejno: metody symboliczne, sieci neuronowe i systemy ekspertowe.

Przypomnę też wprowadzoną w tym pierwszym artykule koncepcję, że słowo „wyspa”, będące oczywiście metaforą jakiejś grupy metod sztucznej inteligencji, będziemy pisać bez cudzośłowu – pamiętając wszakże stale o jego umownym charakterze.

W tym artykule postaram się przedstawić kolejne metody sztucznej inteligencji – także korzystając z owej metafory.

Wyspa mgieł

Metaforyczny obraz, pokazany na rysunku 1, ma przywołać obszar sztucznej inteligencji opisywany jako zbiory rozmyte i logika rozmyta.



Rys. 1. Mglista wyspa jako metafora metod rozmytych

Kontury wyspy się rozmywają, wszystko jest zamglone, nieostre... I tego właśnie potrzebujemy!

Dzieje się tak dlatego, że twórcy sztucznej inteligencji próbujący naśladować w komputerach ludzki sposób rozumowania przez długi czas napotykali istotną przeszkodę, wynikającą z tego, że komputer zawsze operuje pojęciami bardzo ściśle i formalnie zdefiniowanymi, natomiast ludzie myślą w kategoriach niezbyt precyzyjnie określonych, co im wcale nie przeszkadza uzyskiwać użytecznych wniosków. Co więcej – już u zarania sztucznej inteligencji dostrzeżono szereg przykładów zadań, w których nieprecyzyjne myślenie ludzi prowadziło do lepszych rezultatów niż precyzyjne obliczenia komputerowe. Modelując w systemach sztucznej inteligencji metody, jakie ludzie stosują przy rozwiązywaniu życiowych problemów – trzeba więc było

„rozmyć” kategorię sady i pojęcia. W ten sposób powstały **metody rozmyte**, które okazały się bardzo przydatne.

Wyjaśnijmy najpierw, na czym to „rozmycie” polega, zaczynając od podstawowego pojęcia – **zbioru rozmytego**.

Tradycyjna teoria zbiorów (wiązana z nazwiskiem Cantora) przyjmuje bardzo kategorię podział obiektów na te **należące** do zbioru – oraz te, które do zbioru z pewnością **nie należą**. Nie ma żadnych stanów pośrednich, tylko prosta dychotomia: **tak** albo **nie**.

Rozważmy przykład zbioru studentów pierwszego roku dowolnej uczelni. Są oni przyjmowani na studia na podstawie określonej punktacji (najczęściej odwołującej się do wyników matury). Otóż w procesie rekrutacyjnym przyjmuje się zawsze pewien próg liczby punktów, poczynając od którego kandydat może być przyjęty na studia. Każdy, kto ten próg przekroczy, staje się elementem zbioru studentów, a każdy, kto uzyska tych punktów za mało – na ten kierunek studiów przyjęty nie zostanie (rys. 2).



Rys. 2. Zasada tworzenia tradycyjnego zbioru

Wszyscy znamy z praktyki konsekwencje takiego „twardego” podziału. Ci, którzy się dostali, są szczęśliwi. Ci, którym zabrakło wielu punktów – godzą się ze swoim losem i podejmują inne zajęcia. Najgorzej jest tym, którzy znaleźli się „tuż pod kreską”. Każdy, kto uczestniczył w komisji rekrutacyjnej, zna wiele przypadków, gdy ci pechowi kandydaci starają się przekonać, że powinni jednak być przyjęci, bo przecież zabrakło im tylko jednego czy dwóch punktów.

Ale w przypadku zbiorów Cantora kryterium jest twarde i zbiór studentów zostaje domknięty bez żadnej wątpliwości co do tego, jakie elementy powinny do niego należeć, a jakie nie.

Nie zawsze jest to dobre rozwiązanie, a ponadto nie wszystkie zbiory dadzą się wyznaczyć tak kategorię.

Rozważmy przykładowo pojęcie **młodzież**. Często się do niego odwołujemy i wydaje nam się raczej oczywiste.

Tymczasem wcale nie jest ono oczywiste! Nie ulega wątpliwości, że przynależność do zbioru określanego jako „młodzież” jest zależna od dającego się dokładnie wyliczyć parametru, jakim jest wiek. Jeśli wiek jest za mały, to mamy do czynienia z dzieckiem, a nie z młodzieńcem. Jeśli wiek jest za duży – to mamy człowieka w pełni dojrzałego lub nawet starego. Młodzieżą są ci, którzy już nie są dziećmi, a jeszcze nie powinni być zaliczeni do ludzi dojrzałych czy nawet starych.

No dobrze, ale który dzień życia człowieka jest tym momentem, w którym przestaje on być dzieckiem i staje się młodzieńcem? A także w której minucie i sekundzie życia młodość się kończy i zaczyna się wiek dojrzały?

Na pozór jest to „dzielenie włosa na czworo”, bo w działaniach ludzi na ogół potrafimy sobie z tym nieprecyzyjnym pojęciem poradzić. Ale w przypadku komputera problem jest trudny.

Wyobraźmy sobie, że zarząd jakiegoś banku wydał polecenie, że młodzieży należy udzielać kredytów na zasadach preferencyjnych. Komputer bankowy zna datę urodzenia kandydata na kredytobiorcę, więc w każdej chwili może obliczyć jego wiek (z dokładnością do jednego dnia). Ale jak przejść od tej liczby, określającej wiek, do decyzji, czy dany klient zalicza się do młodzieży czy raczej nie?

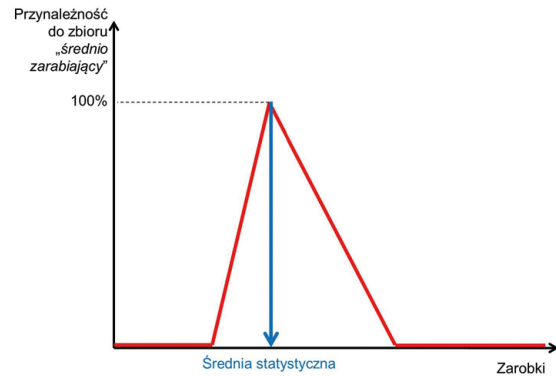
W zdroworozsądkowym podejściu do tego problemu pomaga wprowadzenie tak zwanej **funkcji przynależności**. Obiekty, które z pewnością należą do rozważanego zbioru (w rozważanym przykładzie – młodzieży) otrzymują wartość tej funkcji wynoszącą **100%**. Obiekty, które ponad wszelką wątpliwość do tego zbioru nie należą – otrzymują wartość funkcji wynoszącą **zero**. Ale obiekty z pobliżu granicy mogą otrzymać wartość pośrednią, na 30 albo 70%. Nie ma gwałtownego przeskoku od całkowitej przynależności do całkowitego braku przynależności (lub odwrotnie), tylko łagodne przejście (najczęściej w postaci linii prostej rosnącej lub malejącej) od jednej skrajnej sytuacji do drugiej (rys. 3).



Rys. 3. Funkcja przynależności dla zbioru rozmytego „młodzież”

Ten prosty pomysł okazał się bardzo skuteczny. Można bez trudu podać przykłady różnych użytecznych funkcji przynależności, opisujących różne spotykane w praktyce sytuacje. Na przykład na rysunku 4 pokazano przykładową funkcję przynależności dla zbioru rozmytego „średnio zarabiający”. Warto się przyjrzeć tej funkcji i zastanowić się, czemu nachylenia lewego i prawego zbocza funkcji wyraźnie się różnią?

Jest to wynik psychologicznego mechanizmu polegającego na tym, że ludzie wychodzący z biedy bardzo szybko akceptują swoją przynależność do zbioru średnio zarabiających i znajdują w tym rzetelną satysfakcję. Natomiast dalszy wzrost zarobków



Rys. 4. Funkcja przynależności dla zbioru rozmytego „średnio zarabiający”

powyżej średniej statystycznej, który powinien implikować przekonanie o przechodzeniu do grupy dużo zarabiających – z trudem przyjmowany jest do wiadomości. Ludzie długo są przekonani, że ciągle zarabiają za mało!

Jak dużo subtelnych cech pojęcia „średnio zarabiający” udało się odwzorować w prostym i wygodnym obliczeniowo pojęciu zbioru rozmytego!

Kilka słów warto teraz przytoczyć na temat **logiki rozmytej**. Jest ona dzisiaj chętnie używana, gdyż w odróżnieniu od tradycyjnej logiki dwuwartościowej, w której funkcjonuje ostry podział na prawdę i fałsz – w logice rozmytej możliwa jest ocena, że jakaś sytuacja jest w pewnym stopniu prawdziwa lub częściowo fałszywa – przy czym „dawkowanie” tej prawdy i fałszu może być wyrażone liczbowo, co pozwala odróżnić tezę prawdziwą w 90% od tezy prawdziwej w 15%. Okazuje się, że w wielu zastosowaniach takie podejście jest korzystne.

Tradycyjna logika opiera się na trzech operatorach: negacji, alternatywie i koniunkcji. Jeśli jakieś pierwotne stwierdzenie poprzedzimy operatorem **negacji**, to otrzymujemy stwierdzenie, które jest prawdziwe wszędzie tam, gdzie pierwotne stwierdzenie było fałszywe – i odwrotnie. W logice rozmytej miarą prawdziwości jakiegoś stwierdzenia jest funkcja przynależności. Negację otrzymujemy, gdy w każdym punkcie odejmiemy wartość tej funkcji przynależności od 100%. W efekcie tam, gdzie funkcja przynależności pierwotnego stwierdzenia miała wartość 0 – pojawia się wartość 100%, wszędzie tam, gdzie funkcja przynależności miała wartość 100% pojawia się 0, zaś w stanach pośrednich mamy tym większą wartość funkcji przynależności, im oryginalna funkcja miała wartość mniejszą.

Staram się w tym popularnym artykule unikać ujęć formalnych i wzorów matematycznych, ale kilka muszę tu wprowadzić, żeby ważnej tematyki zbiorów rozmytych nie pozostawić wyłącznie w sferze ogólników. Zacniemy od matematycznej formuły opisującej zbiór rozmyty.

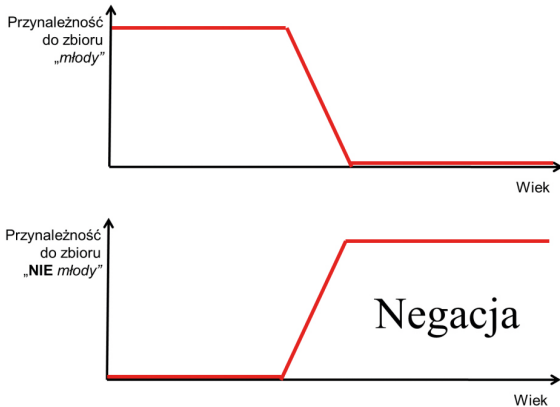
Zbiorem rozmytym A , określonym na przestrzeni X jest zbiór uporządkowanych par:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

gdzie μ_A jest funkcją przynależności do zbioru A , która przyjmuje wartość 1 dla całkowitej przynależności, 0 dla całkowitego braku przynależności oraz wartości pośrednie dla przynależności częściowej

Zbiór B, będący negacją zbioru A, to będzie analogiczny zbiór par, tylko dla każdego $x \in X$

$$\mu_B(x) = 1 - \mu_A(x)$$



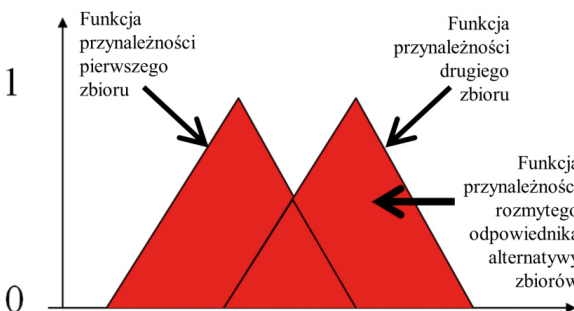
Rys. 5. Przykład działania negacji dla logiki rozmytej

Funkcja negacji jest jednoargumentowa, to znaczy bierze pod uwagę tylko jedno stwierdzenie (którego znaczenie jak gdyby odwraca). Natomiast dwie kolejne funkcje logiczne są dwuarargumentowe. Jako ich argumenty występują dwa stwierdzenia, którym może być przypisana wartość logiczna prawdy lub fałszu, które połączone określonym spójnikiem logicznym tworzą zdanie złożone, którego prawdziwość lub fałszywość może być ustalona według ściśle określonych reguł.

Pierwszym spójnikiem logicznym jest słowo „LUB”. Konstrukcja złożona z dwóch stwierdzeń logicznych połączonych tym spójnikiem nazywa się **alternatywą** (albo sumą logiczną). W klasycznej logice wartością logiczną całej alternatywy jest **prawda**, jeśli chociaż jedno ze składowych stwierdzeń ma wartość **prawda**. Przenosząc tę zasadę do logiki rozmytej, korzystamy z pojęcia tak zwanej s-normy. Bywa ona różnie definiowana, ale najprostsza reguła polega na przypisaniu do wyniku alternatywy **większej** z dwóch wartości funkcji przynależności stwierdzeń składowych:

$$\mu_c(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ dla } x \in X$$

Przykład działania rozmytej alternatywy można obejrzeć na rysunku 6.

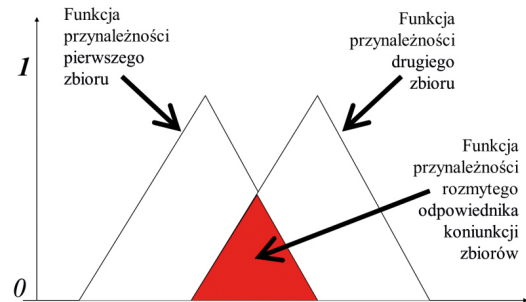


Rys. 6. Cały pokryty kolorem obszar - to funkcja przynależności rozmytej alternatywy

Drugą z dwuarargumentowych funkcji logiki klasycznej jest **koniunkcja** (używany jest spójnik „I”). Funkcja ta przyjmuje wartość **prawda** wtedy i tylko wtedy, gdy oba stwierdzenia składowe są prawdziwe. Przeniesiona do logiki rozmytej koniunkcja zamienia się w tak zwaną t-normę, której najprostsza postać ma formę zasady, że wartość funkcji przynależności wyniku odpowiada **mniejszej** z dwóch wartości funkcji przynależności obu składowych.

$$\mu_c(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ dla } x \in X$$

Ilustracja działania rozmytej koniunkcji pokazana jest na rysunku 7.

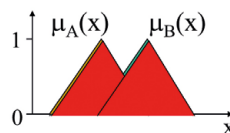


Rys. 7. Pokryty kolorem obszar - to funkcja przynależności rozmytej koniunkcji

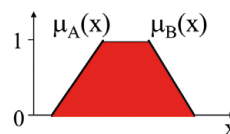
Dla operatorów dwuarargumentowych odpowiednie formuły bywają modyfikowane, więc w sposób ogólny wprowadza się pojęcie tak zwanej S-normy (odpowiadającej alternatywie) oraz T-normy (odpowiadającej koniunkcji). Nie przytaczam tu formalnych wzorów dla tych norm (jest ich dużo!), bo podobno każdy wzór zmniejsza liczbę czytelników o połowę, natomiast na rysunku 8 przedstawiam wynik działania dwóch dodatkowych definicji rozmytej alternatywy i koniunkcji (na dole). U góry dla porównania przywołane rysunki 6 i 7.

S-norma

$$\mu_{A \vee B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

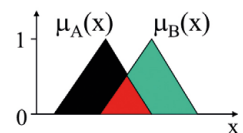


$$\mu_{A \vee B}(x) = \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\}$$

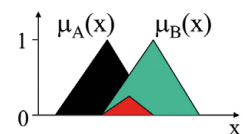


T-norma

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$



$$\mu_{A \wedge B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$



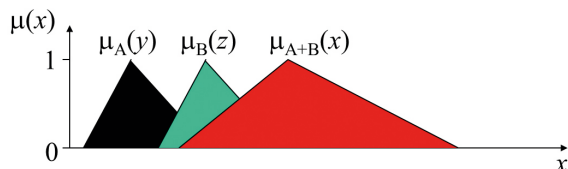
Rys. 8. Przykłady działania różnie zdefiniowanych rozmytych operatorów alternatywy i koniunkcji

Warto dodać, że w podobny sposób jak na rysunku 4 można odwzorować w metodologii zbiorów rozmytych koncepcję **liczb przybliżonych**. Często w różnych okolicznościach posługujemy

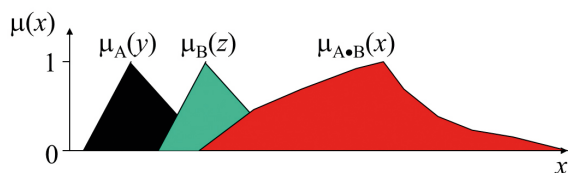
się określeniem „około”, mając na myśli jakąś wartość liczbowa zgrubnie tylko oszacowaną albo zmierzoną z niewielką dokładnością. Na przykład informacja „około 5” może być w komputerze odwzorowana za pomocą zbioru rozmytego, którego funkcja przynależności jest podobna do tej pokazanej na rysunku 4, tylko z maksimum ulokowanym nie w punkcie „średnia statystyczna” tylko przy wartości 5. Funkcja przynależności dla liczb przybliżonych jest zwykle symetryczna (inaczej niż ta pokazana na rysunku 4), chociaż zdarzają się liczby przybliżone, o których z góry wiadomo, że są wyznaczane raczej z nadmiarem (lub z niedomiarem) i wtedy asymetria funkcji przynależności jest uzasadniona.

Reprezentacja liczby przybliżonej za pomocą zbioru rozmytego ma szereg zalet. Po pierwsze, można łatwo różnicować liczby, których przybliżenie jest bardzo niedokładne (odpowiednia trójkątna funkcja przynależności ma wtedy szeroką podstawę) od tych, które są wyznaczone precyzyjniej (funkcja przynależności jest wtedy smukła). Po drugie, w teorii zbiorów rozmytych ustalone są metody wykonywania działań arytmetycznych na tych liczbach, co jest ważne z punktu widzenia praktyki. Jeśli bowiem chcemy wykonać działanie „około 5” mnożone przez „około 3”, to wynik oczywiście jest „około 15”. Jednak istotne jest to, jak bardzo rozmyte jest owo „około 15” w sytuacji, kiedy znamy rozmycie obu liczb budujących iloczyn. Nie ma tu miejsca na szczegółową dyskusję arytmetyki liczb rozmytych, ale warto spojrzeć na rysunek 9, pokazujący, jak wyglądają (i jak są obliczane) funkcje przynależności przy dodawaniu i przy mnożeniu.

Dodawanie: $\mu_{A+B}(x) = \max\{\mu_A(y), \mu_B(z) \mid x = y+z\}$



Iloczyn: $\mu_{A \cdot B}(x) = \min\{\mu_A(y), \mu_B(z) \mid x = y \cdot z\}$



Rys. 9. Sposób obliczania funkcji przynależności wyniku przy działaniach na liczbach rozmytych

Problem wbrew pozorom nie jest tylko akademicki, bo świadomość tego, jak bardzo niedokładny będzie wynik określonych działań wykonywanych na niedokładnych danych, może mieć duże znaczenie praktyczne.

Rozważmy przykład maszyny zbudowanej z wielu części. Każda z tych części jest wykonana z pewną **niedokładnością** w stosunku do wymiarów i kształtów przewidzianych przez konstruktora maszyny, bo proces wytwarzania nigdy nie jest idealny. Zwykle jednak dla elementów składowych wprowadzone są pewne granice tolerancji. Elementy, których wymiary nie są idealne, ale mieszczą się w granicach tolerancji – są

używane do produkcji finalnego wyrobu. Ważne pytanie jest jednak następujące: Jak stopień rozmycia wymiarów elementów składowych wpłynie na stopień rozmycia działania końcowego urządzenia? Może się przecież zdarzyć, że urządzenie zmontowane z niedokładnie wykonanych elementów będzie działać w sposób tak odległy od pierwotnych zamierzeń, że będzie nieprzydatne. Możliwość przewidzenia tego ryzyka i oszacowania jego wielkości poprzez funkcje przynależności odpowiedniego zbioru rozmytego – to bardzo istotne udogodnienie przy planowaniu różnych technologii.

W tym przeglądowym artykule nie ma niestety miejsca na obszerniejszą dyskusję metod sztucznej inteligencji opartych na koncepcji zbiorów rozmytych i logiki rozmytej, a także metod wnioskowania rozmytego, ale jeszcze raz warto podkreślić, że opierając się na tym podejściu, rozwiązano bardzo wiele praktycznych problemów, zwłaszcza związanych z automatyką i robotyką.

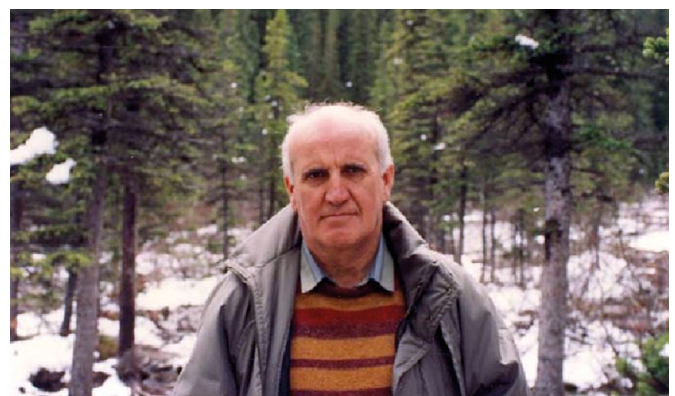
Zbiory przybliżone

Omówioną wyżej teorię zbiorów rozmytych (*fuzzy sets*) stworzył Lofti Zadeh, Amerykanin irańskiego pochodzenia, z którym miałem okazję współpracować – między innymi przy redagowaniu książek (rys. 10).



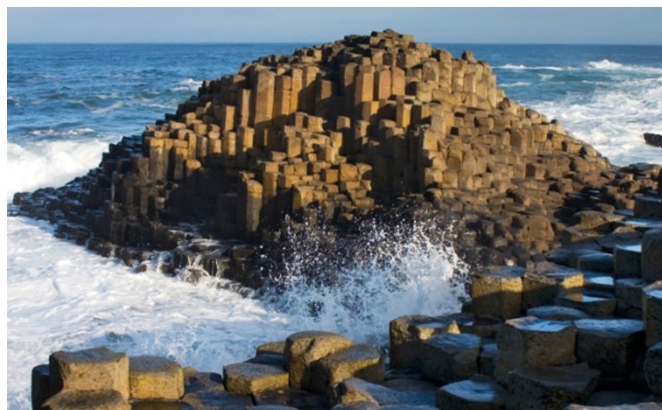
Rys. 10. Przykładowe dwie książki z większego zbioru prac wspólnie redagowanych (między innymi) przez autora tego artykułu i twórcę zbiorów rozmytych Lofti Zadeha

Natomiast twórcą podobnego, ale pod wieloma względami odmiennego, zestawu metod sztucznej inteligencji wchodzących w skład tzw. „teorii zbiorów przybliżonych” (*rough sets*) był Polak, prof. Zdzisław Pawlak, z którym także blisko współpracowałem w Komitecie Badań Naukowych i w Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych. Wyjątkowo zamieszczę tu jego fotografię (rys. 11), bo bez wątpienia jest to jedyny polski kreator całkowicie nowej wyspy w archipelagu sztucznej inteligencji.



Rys. 11. Prof. Zdzisław Pawlak, twórca teorii zbiorów przybliżonych

Wyspę stworzoną przez prof. Pawlaka przedstawiam na rysunku 12.



Rys. 12. Wyspa reprezentująca metody zbiorów przybliżonych

Na marginesie warto dodać, że pokazywane na tym rysunku (i na następnych) formacje geologiczne złożone z oddzielnych słupów bazaltowych pochodzą z wybrzeża Irlandii Północnej (tak zwana Grobla Olbrzyma) i zostały przeze mnie wybrane, bo – moim zdaniem – dobrze ilustrują zasadnicze idee teorii zbiorów przybliżonych, a jednocześnie kojarzą się z metaforą wyspy, która jest stale tu przywoływana.

Cechą wyróżniającą tę wyspę jest fakt, że formujące ją skały są rozbite na osobne bazaltowe słupy, których już podzielić nie można, więc w każdym kontekście trzeba brać zawsze pod uwagę cały słup, wiążąc z nim decyzję pozytywną albo negatywną. To rozbicie przestrzeni, w której zdefiniowane jest Uniwersum rozważanych tu metod na tak zwane zbiory elementarne (niepodzielne – patrz rys. 13), wynika z faktu, że parametry definiujące wszelkie obiekty w tym Uniwersum są mierzone (lub w inny sposób ustalane) z **ograniczoną dokładnością**, w wyniku czego każdy zbiór jest „ziarnisty”. Będą z tego powodu istnieć w tym Uniwersum obiektywnie oddzielne obiekty (punkty w obrębie jednego słupa), które jednak będą niemożliwe do rozróżnienia.



Rys. 13. Obrazowe przedstawienie właściwości Uniwersum, w którym definiowane będą zbiory przybliżone

Taka struktura Uniwersum powoduje, że jeśli będziemy chcieli w nim wyznaczyć jakieś granice pomiędzy obszarami, w których powinno się podejmować przeciwstawne decyzje – to

może pojawić się obszar, w którym ani pozytywna, ani negatywna decyzja nie będzie w pełni uzasadniona. Przy tradycyjnym podejściu do podejmowania decyzji granica pomiędzy obszarem decyzji pozytywnych i negatywnych jest ostra i dobrze określona w każdym miejscu. Rozważmy sytuację przedstawioną na rysunku 14. Widoczny jest na nim obszar **ciągły**, w którego niektórych miejscach (suchy ląd) decyzja pozytywna jest pewna i oczywista, oraz drugi obszar (toń morza), gdzie równie pewna i oczywista jest decyzja negatywna.



Rys. 14. Przykład ciągłego Uniwersum, w którym decyzje są pewne i jednoznaczne

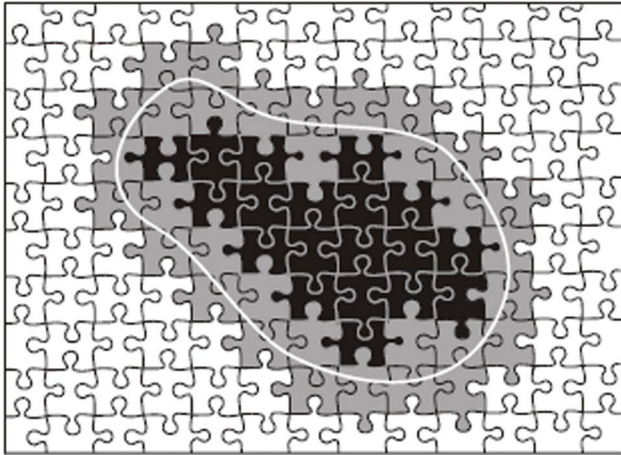
Rozważmy jednak sytuację w przypadku Uniwersum złożonego ze zbiorów elementarnych (rys. 15).



Rys. 15. Przykład problemu decyzyjnego w przypadku zbioru przybliżonego

Na tym przykładzie widzimy, że w przypadku zbioru przybliżonego są obszary całkiem pewnych decyzji: pozytywnych na całkiem suchych słupach bazaltowych po prawej stronie i negatywnych w głębi morskiej toni. Ale są też obszary wieloznaczne, słupy bazaltowe częściowo zalane. Spełniają one po trosze kryteria zarówno przynależności do obszaru decyzji pozytywnych i po części mają cechy obszaru decyzji negatywnych. To one tworzą ważny w teorii zbiorów przybliżonych **brzeg zbioru**. Można to obejrzeć na rysunku 16.

Mamy na nim Uniwersum złożone ze zbiorów elementarnych (puzzle), na którym białą linią zaznaczono granice rozważanego zbioru. Widać, że niektóre puzzle (czarne na rysunku) bezdyskusyjnie do tego zbioru należą. Jest to tak zwana dolna aproksymacja zbioru. Inne puzzle (białe) z pewnością do niego nie należą. Jest to tak zwany obszar negatywny. Ale są też takie,



Rys. 16. Ilustracja podstawowych pojęć w teorii zbiorów przybliżonych

które należą częściowo, są więc także zaciemnione, chociaż nie w takim stopniu jak te, które należą do zbioru w sposób bezdyskusyjny. Cały ten ciemny obszar (w części zaciemniony mocniej, a w części słabiej) na rysunku 16 nazwiemy górną aproksymacją zbioru. Szare puzzle, te częściowo należące do zbioru i częściowo nie należące, nazywa się **brzegiem** zbioru.

Formalna definicja mówi: Zbiór jest **zbiorem przybliżonym**, jeżeli jego brzeg jest zbiorem niepustym, czyli dolna aproksymacja tego zbioru jest **różna** od górnej aproksymacji tego zbioru. Jeżeli dolna i górna aproksymacja zbioru są równe, to wtedy zbiór jest **dokładnie zdefiniowany**.

Żeby nie poprzestawać na obrazkach z abstrakcyjnymi puzzlami czy z bazaltowymi słupami – rozważmy przykład bazy danych szpitalnych, na podstawie której algorytm sztucznej inteligencji powinien sugerować diagnozę dla nowego pacjenta na podstawie danych tych, którzy byli wcześniej leczeni. Diagnoza będzie dotyczyła wykrycia, czy pacjent jest chory na COVID – czy nie, bo jak wszyscy pamiętamy, to rozróżnienie było w całym 2020 roku bardzo ważne.

Oczywiście to, co będę mógł pokazać na rysunku 17, to będzie miniaturka takiej **hipotetycznej** bazy danych, która w rzeczywistości powinna zawierać dziesiątki kolumn podających różne

Pacjent	Ból głowy	Ból mięśni	Temperatura	COVID
1	nie	tak	podwyższona	tak
2	tak	nie	podwyższona	tak
3	tak	tak	wysoka	tak
4	nie	tak	normalna	nie
5	tak	nie	podwyższona	nie
6	nie	nie	wysoka	tak

Rys. 17. Przykładowa baza danych dla systemu automatycznej diagnostyki

symptomy i powinna obejmować tysiące wierszy, rejestrujących dane wcześniej badanych i leczonych pacjentów.

Pierwszy rzut oka na tę tabelkę nie ujawnia tego faktu, ale mamy tu do czynienia ze zbiorem przybliżonym, bo pacjenci nr 2 i 5 mają te same symptomy (więc należą do tego samego zbioru elementarnego), ale diagnoza u nich jest różna: jeden choruje na COVID, a drugi nie. Mamy więc przybliżenie dolne zbioru chorych na COVID (pacjenci 1, 3 i 6), przybliżenie górne tego zbioru (pacjenci 1, 2, 3, 5 i 6) oraz obszar brzegowy (pacjenci 2 i 5).

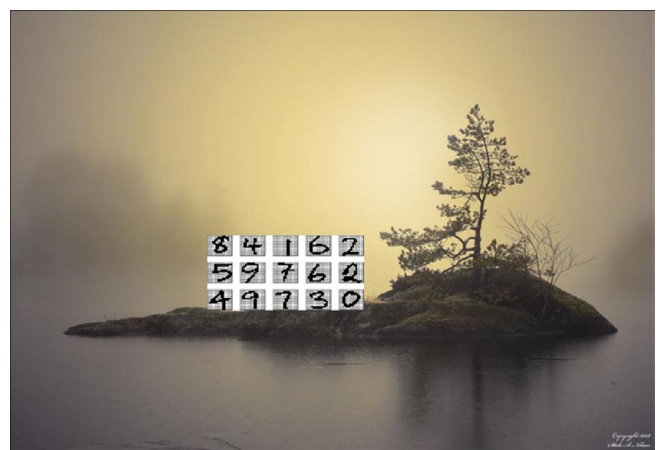
Jak wspominałem, teoria zbiorów przybliżonych (*rough sets*) została utworzona przez prof. Zdzisława Pawłaka, ale obecnie zajmują się nią ludzie na całym świecie, czego przykładem może być tom materiałów z rokrocznie odbywającej się (w różnych krajach świata) konferencji International Joint Conference On Rough Sets, do której mam duży sentyment, bo od wielu lat jestem członkiem Komitetu Naukowego owych kolejnych Konferencji. Fragment okładki wspomnianego zbioru materiałów przytaczam na rysunku 18.



Rys. 18. Fragment okładki materiałów z International Joint Conference On Rough Sets

Rozpoznawanie obrazów (*pattern recognition*)

Programy realizujące zadania określane po angielsku jako *pattern recognition* (tłumaczone w Polsce jako automatyczne rozpoznawanie obrazów) są kolejną wyspą, którą warto poznać (rys. 19).

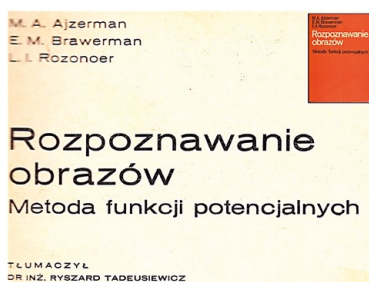


Rys. 19. Wyspa symbolizująca metody rozpoznawania obrazów

Metody *pattern recognition* mogą służyć do automatycznej klasyfikacji i rozpoznawania różnych obiektów. Powstały one bardzo wcześnie, w latach 60. XX wieku, ale początkowo były utajnione, bo ich obszary zastosowań miały związek z wojskiem. Algorytmy *pattern recognition* były stosowane do przeglądania zdjęć szpiegowskich (lotniczych, a potem satelitarnych, stąd pierwotna nazwa „rozpoznawanie obrazów”), ale potem także

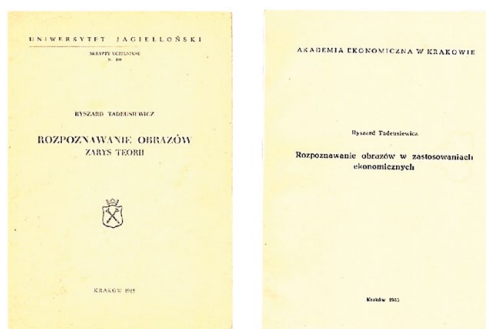
do rozpoznawania szumów wrogich okrętów podwodnych, a także głosów ludzi. Potem metody te przeszły do cywila i znalazły mnóstwo zastosowań. Rozpoznawanymi obrazami stały się na przykład odciski palców lub wizerunki ludzkich twarzy, rozpoznawanymi dźwiękami tony i szmery serca w diagnostyce kardiologicznej, rozpoznawanymi sygnałami wibracje maszyn w diagnostyce technicznej, rozpoznawanymi wzorcami dane ekonomiczne firm ubiegających się o kredyt – przykładów można by było przytaczać mnóstwo.

Zajmowałem się tym problemem od początku lat 70., najpierw tłumacząc rosyjskie książki na ten temat (które nadały za osiągnięciami amerykańskimi, a były w Polsce blisko **stukrotnie** tańsze od amerykańskich oryginałów). Przykład takiego tłumaczenia można zobaczyć na rysunku 20.



Rys. 20. Pierwsza książka o rozpoznawaniu obrazów wydana w 1975 roku w języku polskim

Potem w 1985 roku wydałem dwie własne książki [1, 2] na ten temat (rys. 21).



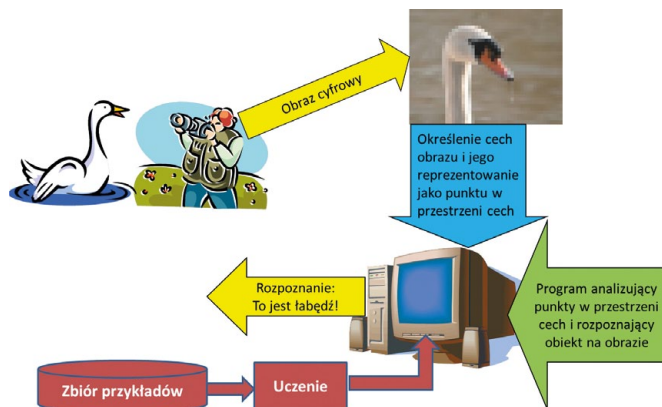
Rys. 21. Książki prezentujące rozpoznawanie obrazów od strony teorii i zastosowań

Jeszcze jedna książka ukazała się w 1987 r. [4], kolejna w 1991 roku [3] i jeszcze jedna w 1992 r. (o zawężonym zakresie zastosowań rozpoznawania do samej robotyki [5]) oraz w kontekście potrzeb medycznych w 2011 [6].

Mając bardzo osobisty stosunek do metod rozpoznawania obrazów (stosowanych także przy rozpoznawaniu mowy [7]), tym tematem wypełnię tekst tego artykułu aż do jego końca, zapowiadając, że w następnym numerze miesięcznika „Napędy i Sterowanie” pojawi się kolejny odcinek „Archipelagu sztucznej inteligencji”, bo w kolejce czeka jeszcze sporo interesujących wysp!

Ogólny schemat procesu rozpoznawania (w tym węższym znaczeniu, sprowadzonego wyłącznie do rozpoznawania obrazów) przedstawiony został na rysunku 22.

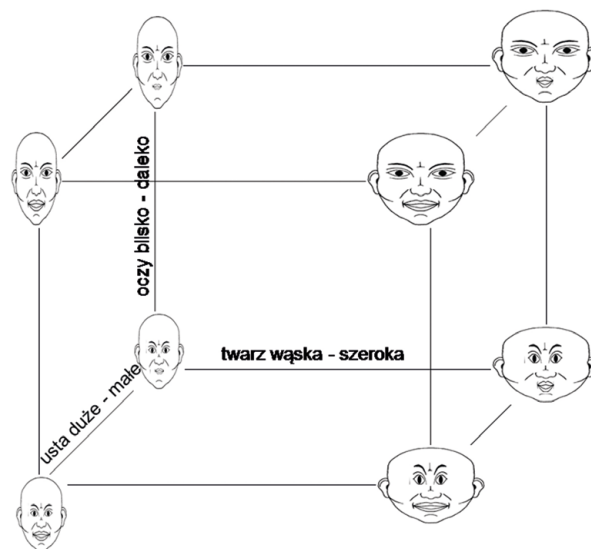
Pierwszą czynnością jest pozyskanie obrazu w formie cyfrowej. Dzisiaj jest to trywialne, bo wszystkie aparaty fotograficzne czy kamery TV dostarczają obrazy właśnie w tej postaci, ale na początkowym etapie prac nad rozwojem automatycznego rozpoznawania obrazów trzeba było samemu budować konwerter



Rys. 22. Schemat systemu rozpoznawania obrazów – dyskusja w tekście

analogowo-cyfrowy i pamięć buforową, żeby wprowadzić do komputera obraz z kamery analogowej (bo tylko takie były dostępne) [8].

Obraz cyfrowy jako struktura danych o bardzo dużym rozmiarze (od kilkuset kB do kilku MB) jest niewygodny do bezpośredniego rozpoznawania, dlatego jego wprowadzeniu do systemu rozpoznającego musi towarzyszyć proces określania **cech** obrazu. Cechy mogą być ilościowe albo jakościowe. Odkładane na osiach układu współrzędnych tworzą **przestrzeń cech** (rys. 23).

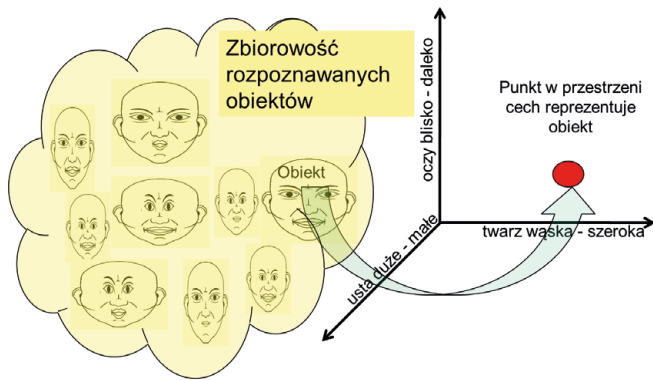


Rys. 23. Przykładowa przestrzeń cech przydatna przy rozpoznawaniu twarzy

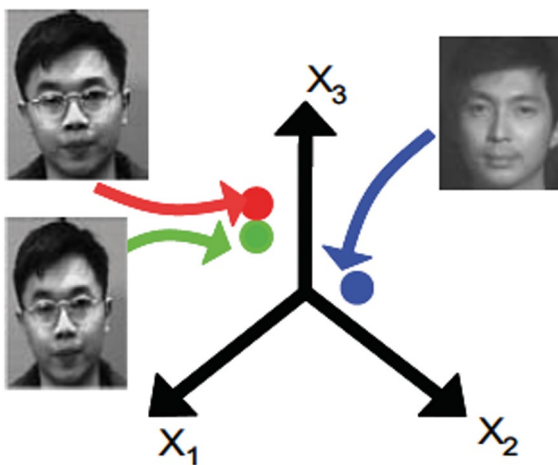
W tej przestrzeni cech każdy konkretny obraz ma swoją dokładnie określoną lokalizację. Określenie cech zamienia więc obraz na punkt w przestrzeni cech (rys. 24).

Przy dobrze dobranej przestrzeni cech punkty odpowiadające bardzo podobnym obrazom gromadzą się blisko siebie, natomiast punkty reprezentujące obrazy niepodobne – lokują się daleko (rys. 25).

Ponieważ reguły rozpoznawania są zwykle nieznanne – podstawą działania algorytmu rozpoznającego jest to, że przed jego użyciem do rozpoznawania odbywa się jego uczenie. Polega ono na tym, że wykorzystuje się bazę danych, w której zawarty jest zbiór przykładów – na przykład zbiór wizerunków twarzy z informacjami, kto jest kim (rys. 26).



Rys. 24. Przejście od obrazu do punktu w przestrzeni cech



Rys. 25. Reprezentacja różnych obrazów w przestrzeni cech



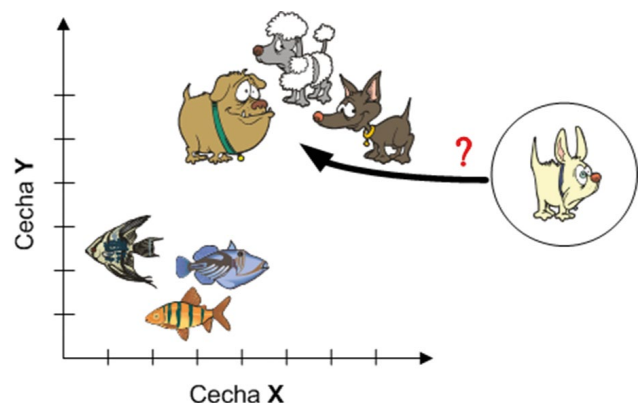
Rys. 26. Fragment zbioru przykładów do rozpoznawania twarzy

Oczywiście w rzeczywistości taki zbiór uczący musi być bardzo liczny, bo twarz każdego branego pod uwagę człowieka trzeba wiele razy pokazać algorytmowi rozpoznającemu – w różnym oświetleniu, w różnej pozycji (*en face* oraz po niewielkim obrocie w lewo i w prawo albo w pochyleniu lub podniesieniu głowy), w różnych układach mimicznych itd.

A ludzie do rozpoznawania mogą być setki lub nawet miliony (w Chinach, gdzie kamery bezpieczeństwa są w stanie rozpoznawać wszystkich mieszkańców miast). Dlatego uczenie w systemach rozpoznawania obrazów jest procesem długotrwałym i trudnym.

Warto tu dodać jedną uwagę. Przykład rozpoznawania twarzy, o którym była wcześniej mowa, bo można było go ilustrować sugestyjnymi rysunkami, jest w istocie przykładem nietypowym, bo różne obrazy twarzy tego samego człowieka trzeba przypisać do jednego identyfikatora (nazwiska). W typowych przykładach rozpoznawanie obrazów polega na tym, że obrazy grupuje się w pewne kategorie (na przykład psy i ryby – patrz rys. 27) i nowy obiekt trzeba zaliczyć do jednej z tych kategorii.

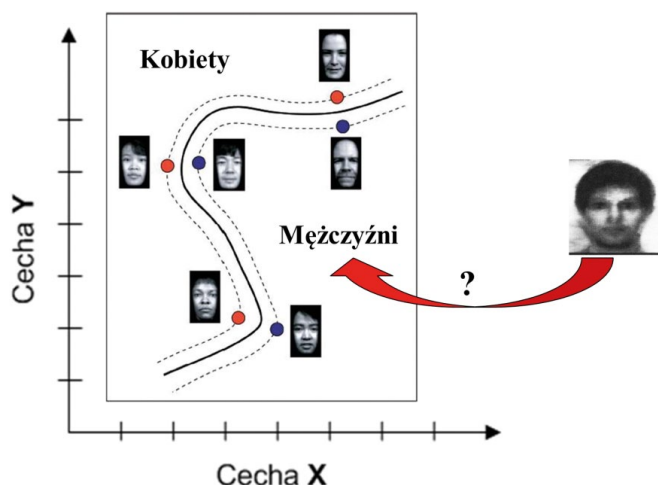
Niektóre metody rozpoznawania obrazów polegają na zapamiętaniu całego zbioru uczącego (w postaci punktów w przestrzeni cech) i na zaliczaniu nieznanego obrazu do tej kategorii, do której należy większość punktów, reprezentujących zapamiętane obiekty zbioru uczącego, znajdujących się w pobliżu punktu, w którym znalazła się reprezentacja rozpoznawanego (nieznanego) obrazu. Na rysunku 27 pokazano żartobliwie istotę takiego rozpoznawania, nazywanego *NN* (od *Nearest Neighbor*) albo *kNN* (*k Nearest Neighbors*), gdy bierze się pod uwagę grupę *k* najbliższych sąsiadów, wśród których powinni dominować przedstawiciele tej kategorii, która powinna być wskazana jako proponowane rozpoznanie.



Rys. 27. Żartobliwe przedstawienie istoty rozpoznawania metodą najbliższego sąsiada w przestrzeni cech

Metoda *kNN* jest skuteczna, ale kłopotliwa, bo trzeba trzymać w pamięci wszystkie obiekty zbioru uczącego, obliczać ich odległości od punktu reprezentującego obiekt wymagający rozpoznania i wyszukiwania *k* najmniejszych odległości. Żeby usprawnić proces rozpoznawania, inne metody zakładają, że jest możliwe stworzenie (w trakcie nauki) linii granicznej pomiędzy obiektami należącymi do różnych kategorii i podejmowanie decyzji na podstawie położenia nowego punktu po jednej lub drugiej stronie owej linii granicznej (rys. 28).

Oczywiście realizacja tego pomysłu wymaga dopracowania szeregu elementów: matematycznego opisu linii granicznej (która w istocie jest hiperpowierzchnią w *n*-wymiarowej przestrzeni, ponieważ zwykle bierzemy pod uwagę wiele cech), sposobu formowania tej granicy w procesie uczenia, sprawnego określenia położenia nowego punktu w stosunku do licznych powierzchni granicznych przy rozpoznawaniu, które zakłada



Rys. 28. Rozpoznawanie na podstawie podziału przestrzeni cech na obszary przypisane do różnych kategorii

istnienie wielu kategorii itp. Ale w metodach rozpoznawania obrazów wszystkie te zagadnienia zostały rozwiązane i odpowiednie algorytmy są możliwe do wykorzystania.

Na koniec chcę jeszcze raz z naciskiem podkreślić, że metody *pattern recognition* mogą klasyfikować i kategoryzować rozmaite obiekty, czego przykładem mogą być moje dawne prace [9, 10, 11 i 12].

O kolejnych wyspach w archipelagu sztucznej inteligencji napiszę w następnym numerze miesięcznika „Napędy i Sterowanie”. Będzie ciekawie!

Literatura

[1] TADEUSIEWICZ R.: *Rozpoznawanie obrazów – zarys teorii*. Skrypt UJ nr 499, Kraków 1985, https://www.academia.edu/42059662/Rozpoznawanie_obrazow_-_zarys_teorii.

[2] TADEUSIEWICZ R.: *Rozpoznawanie obrazów w zastosowaniach ekonomicznych*. Skrypt AE, Kraków, 1985 https://www.academia.edu/42124750/Rozpoznawanie_obrazow_w_zastosowaniach_ekonomicznych.

[3] TADEUSIEWICZ R., FLASIŃSKI M.: *Rozpoznawanie obrazów*. PWN, Warszawa 1991, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty/0005/>; http://otworzksiazke.pl/ksiazka/rozpoznawanie_obrazow/.

[4] TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty2/0098/>.

[5] TADEUSIEWICZ R.: *Systemy wizyjne robotów przemysłowych*. WNT, Warszawa 1992.

[6] TADEUSIEWICZ R., ŚMIETAŃSKI J.: *Acquisition of Medical Images and their Processing, Analysis, Automatic Recognition and Diagnostic Interpretation* [In Polish: *Pozyskiwanie obrazów medycznych*

oraz ich przetwarzanie, analiza, automatyczne rozpoznawanie i diagnostyczna interpretacja]. Wydawnictwo STN, Kraków 2011, http://hps.biblos.pk.edu.pl/ST/2011/07/100000258879/100000258879_Tadeusiewicz_Pozyskiwanie.pdf.

[7] TADEUSIEWICZ R.: *Sygnal mowy* (Monografia książkowa wydana w serii „Problemy elektroniki i telekomunikacji”). WKiŁ, Warszawa 1988, <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty/0004/>; http://otworzksiazke.pl/ksiazka/sygnal_mowy/.

[8] TADEUSIEWICZ R.: *Cyfrowe przetwarzanie obrazów telewizyjnych w celu ich analizy i rozpoznawania*. W mat. IV Sympozjum MPN WEAE AGH, 1978, str. 5–8, https://www.academia.edu/30259841/Cyfrowe_przetwarzanie_obrazow_C3%B3w_telewizyjnych_w_celu_ich_analazy_i_rozpoznawania.

[9] TADEUSIEWICZ R., MYSONA-BYRSKA E., KORPAL E.: *Ustalenie rodzaju potrzebnej terapii w przypadku raka sutka metodą rozpoznawania obrazów z zastosowaniem maszyny cyfrowej*. W mat. konferencji „Elektronika i automatyka w służbie medycyny”, Katowice 1974, str. 84–86, https://www.academia.edu/37300005/Ustalenie_rodzaju_potrzebnej_terapii_w_przypadku_raka_sutka_metoda_rozpoznawania_obrazow_z_zastosowaniem_maszyny_cyfrowej.

[10] GÓRECKI H., SKOWINIAK A., TADEUSIEWICZ R.: *Analiza możliwości zastosowania układów uczących się do rozpoznawania obrazów dźwiękowych. Teoria sterowania – część V*. Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 1975, str. 143–156, https://www.academia.edu/37425367/Analiza_mozliwosci_zastosowania_ukladow_uczacych_sie_do_rozpoznawania_obrazow_dzwiekowych.

[11] TADEUSIEWICZ R.: *Próba zastosowania rozpoznawania obrazów w diagnostyce neuroinfekcji*. W pracy zbiorowej: *Systemy informatyczne w diagnostyce i terapii*. Akademia Medyczna, Kraków 1977, str. 68–76; https://www.academia.edu/34142340/Pr%C3%B3ba_zastosowania_rozpoznawania_obrazow_w_diagnostyce_neuroinfekcji.

[12] KORDEK J., NIPL R., NOWIKOW P., ROMANOWSKI J., SZUBA T., TADEUSIEWICZ R.: *Rozpoznawanie obrazów optycznych w przeróbce surowców mineralnych*. W mat. Sympozjum „Automatyzacja procesów przeróbki węgla”, Katowice 1978, str. 148–154, PDF https://www.academia.edu/34304023/Rozpoznawanie_obrazow_C3%B3w_optycznych_w_przer%C3%B3bce_surowcow_C3%B3w_mineralnych.

prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz
AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
e-mail: rtad@agh.edu.pl, www.Tadeusiewicz.pl

reklama



Najnowsze informacje ze świata robotyki
katalog branżowy | aplikacje robotów | targi



● Era górnictwa zbliża się ku końcowi szybciej niż pierwotnie zakładano. Konsekwencją niedawnego szczytu Rady Unii Europejskiej jest decyzja o zwiększeniu celu redukcji emisji CO₂ do 55% do 2030 roku, co sprawia, że Śląsk i inne regiony górnicze stają przed obliczem trudnych zmian, na które infrastruktura gospodarcza i społeczna nie jest gotowa. Zamykanie kopalń w bardzo istotnym stopniu odbije się na funkcjonowaniu i kondycji ekonomicznej całych regionów. Zmiany najmocniej odczuje województwo śląskie, gdyż do tu w zdecydowanej większości skoncentrowane jest górnictwo i wiele ściśle z nim powiązanych przedsiębiorstw z branży okołogórnicznej.

Liczba mieszkańców Śląska to 4 489 000 osób, z czego górnicy to ok. 83 000 mieszkańców, a nawet 400 000 pracowników zatrudnionych jest w firmach okołogórnicznych i firmach z nimi współpracujących. Jeśli weźmiemy pod uwagę rodziny osób związanych zawodowo z sektorem górniczym, można szacować, że od jego kondycji zależy byt około 2 mln osób, co stanowi niemal połowę populacji Śląska. Podobna sytuacja ma miejsce również w innych regionach górniczych w Polsce.

Należy więc spojrzeć szeroko na konsekwencje zamykania górnictwa. Spojrzenie na najbliższe otoczenie, czyli tradycyjnie rozumianą branżę okołogórniczną, również wydaje się zbyt wąskie. O Śląsku trzeba myśleć jako jednym organizmie gospodarczym.

– Górnicza Izba Przemysłowo-Handlowa skupia podmioty branży wydobywczej i okołogórnicznej. Dzięki prowadzonej od 30 lat działalności posiadamy zarówno wiedzę, jak i pełną świadomość, ilu osobom górnictwo i podmioty z nim związane zapewniają źródło utrzymania. Firmy okołogórniczne – te, które w PKD wykazują usługi dla górnictwa – często współpracują z wieloma innymi podmiotami, które zatrudniają tysiące pracowników i które nie są identyfikowane jednoznacznie jako branża górnicza. Izba jest naturalnym partnerem do rozmów ze stroną rządową i społeczną o wsparciu podmiotów, które mogą uciepnieć

lub – powiedzmy wprost – mogą przestać istnieć bez pomocy tych, którzy dziś wspierają polskie górnictwo – mówi Janusz Olszowski, prezes GIPH.

Konieczne jest więc wypracowanie systemowych narzędzi pomocowych. Możliwe jest to tylko w dialogu z przedstawicielami podmiotów, dzięki którym będzie możliwa transformacja energetyczna i ekonomiczna, ale również z firmami okołogórnicznymi oraz innymi podmiotami działającymi na Śląsku oraz w pozostałych regionach górniczych, w tym z samorządem. Przedsiębiorstwa te posiadają unikalny know-how, relacje międzynarodowe i zazwyczaj zidentyfikowały już obszary, w których mogłyby kontynuować działalność przy wsparciu rządu.

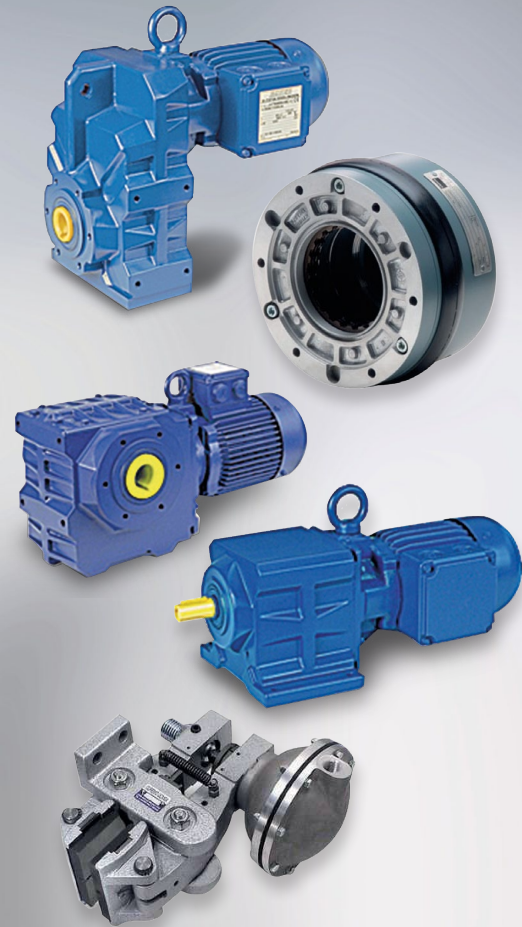
– Firmy z branży okołogórnicznej spodziewały się nadchodzącego spowolnienia gospodarczego, jednak pandemia koronawirusa, a także najnowsze decyzje podjęte na szczycie w Unii Europejskiej sprawiają, że sytuacja stała się na tyle trudna, że bez dialogu i planu działań setki tysięcy miejsc pracy są zagrożone. Dodatkową trudność stanowi dualizm koniecznych do podjęcia działań, gdyż do czasu wygaszenia górnictwa w Polsce branża w dalszym ciągu będzie musiała świadczyć swoje usługi sektorowi górnictwa, zapewniając bezpieczeństwo i ciągłość jego działania w okresie planowanej transformacji, jednocześnie szukając możliwości dywersyfikacji i przebrązowania pracowników, co stanowi olbrzymie wyzwanie dla nas wszystkich – mówi Mirosław Bendzera, Prezes Zarządu Grupy FAMUR.

Zamiast więc w sposób sztuczny mnożyć pomysły na nowe projekty, o wiele łatwiej wykorzystać już istniejące i często działające – lecz na mikroskalę – projekty biznesowe lub wspierać nowe, ale do których realizacji na Śląsku istnieje potrzebne zaplecze w postaci wiedzy, ludzi czy parków maszynowych. Branża okołogórniczna jest głęboko przekonana, że to ostatni moment na stworzenie planu i konsekwentnej realizacji wypracowanych rozwiązań.

Źródło: Polska Izba Przemysłu Chemicznego

reklama

Razem możemy osiągnąć więcej!



Oferujemy sprzedaż oraz serwis dla:

- Motoreduktorów
- Silników elektrycznych i przekładni
- Elektrobębnow
- Sprzęgieł i hamulców

Nowość w ofercie

- POMIARY WIBROAKUSTYCZNE
- POMIARY TERMOWIZYJNE
- POMIARY OCHRONNE



STEINLEN Polska Sp. z o.o.
ul. W. Grabskiego 4/8, 63-500 Ostrzeszów
tel. 62 732 23 50 lub 52, fax 62 732 23 51
www.steinlenpolska.pl

Decyzyjna optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba za pomocą nakładkowych drzew logicznych

Marian A. Partyka, Maria Natowska

1. Wstęp

Coraz częściej stosowane są układy hydrauliczne ze względu na zdolność przenoszenia dużej mocy przy stosunkowo wysokiej sprawności. Jednym z głównych elementów każdego układu są generatory energii strumienia cieczy. W przemyśle najczęściej stosowane są pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym. Udział ich jest szacowany na około 50%. Powszechne ich zastosowanie wynika ze zwartej i prostej konstrukcji, niedużych gabarytów w porównaniu do innych jednostek pompujących, dużego współczynnika sprawności, dużej odporności na zanieczyszczenia czynnika roboczego, niezawodności działania oraz niskiego kosztu produkcji. Oprócz tego jednostki zębate mogą pracować z dużymi prędkościami obrotowymi i pod tym względem przeważają nad innymi rodzajami pomp wyporowych. Wymienione wyżej zalety, a także sprawność całkowita dochodząca do 90% oraz wysokie ciśnienia robocze, dochodzące do 30 MPa, mają wpływ na rozległe zastosowania w układach napędowych, sterowniczych lub smarowniczych urządzeń i maszyn. Aby uniknąć złożoności obliczeniowej typu wykładniczego w skomplikowanych sytuacjach procesu projektowania, ważne jest odpowiednie oprogramowanie przedstawionych metod projektowania za pomocą grafów i drzew rozgrywających parametrycznie oraz zapisanie algorytmiczne. Prawidłowa praca układu będzie zależała od cech i własności dynamicznych układu lub elementu, od zmian wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych [1–3].

2. Badania hydrauliczne pompy zębatej z podciętą stopą zęba

Chcąc zoptymalizować pompę zębatą, należy obliczyć sprawności: hydrauliczno-mechaniczną (η_{hm}), objętościową (η_v) oraz całkowitą (η_c). Ze względu na występujący konflikt modelowy często sprawność całkowitą oblicza się bezpośrednio przy jednoczesnym założeniu spełnienia dopuszczalnego poziomu pozostałych sprawności.

Sprawność całkowita pompy definiowana jest stosunkiem mocy wyjściowej (N_{wy}) do mocy włożonej (N_{we}) lub jako [3–7]:

$$\eta_c = \frac{N_{wy}}{N_{we}} \cong \eta_v \cdot \eta_{hm} \quad (1)$$

Sprawność objętościową pompy zębatej (η_v) określa stosunek wydajności rzeczywistej Q_{rz} do wydajności teoretycznej Q_t :

$$\eta_v = \frac{Q_{rz}}{Q_t} \quad (2)$$

Streszczenie: Optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba wymaga obliczenia sprawności objętościowej, hydrauliczno-mechanicznej oraz całkowitej. Ze względu na konflikt modelowy często oblicza się bezpośrednio sprawność całkowitą przy założeniu spełnienia dopuszczalnego poziomu pozostałych sprawności. Nakładkowe drzewa logiczne są dodatkową niezależną metodą.

DECISION OPTIMIZATION OF A GEAR PUMP AFTER TOOTH ROOT UNDERCUTTING BY MEANS OF MULTI-DIMENSIONAL LOGIC TREES

Abstract: Optimization of the gear pump after tooth root undercutting requires calculations of volumetric, mechanical and total efficiencies. Because of the model conflict, total efficiency is often calculated on the assumption that the other efficiencies are acceptable. Multiple – dimensional logical trees are the additional independent method.

Na całkowite straty objętościowe w pompie mają wpływ następujące parametry: ścisłość cieczy, odkształcenia elementów pompy, przecieki wewnętrzne, proporcjonalne do lepkości i gęstości cieczy oraz niecałkowite wypełnienie komór roboczych w okresie ssania. Mając na względzie wszystkie współczynniki oraz zależności między nimi, otrzymuje się wzór na sprawność objętościową:

$$\eta_v = 1 - c_\mu \cdot \frac{p}{2\pi \cdot \mu \cdot n} - c_r \cdot \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \cdot \sqrt[3]{q^{-1}} \quad (3)$$

gdzie:

c_μ – współczynnik (zależy od wymiarów szczelin i rodzaju oraz wydajności właściwej pompy);

p – ciśnienie robocze; q – wydajność właściwa;

ρ – gęstość cieczy; n – prędkość obrotowa;

μ – lepkość dynamiczna cieczy;

c_r – współczynnik (zależny od rodzaju i wymiarów szczelin w pompie oraz od rodzaju i wydajności właściwej pompy).

Sprawność hydrauliczno-mechaniczna pompy (η_{hm}) definiowana jest stosunkiem momentu teoretycznego M_t do sumy momentu teoretycznego M_t i momentu strat hydrauliczno-mechanicznych ΔM :

$$\eta_{hm} = \frac{M_t}{\Delta M + M_t} \quad (4)$$

Ostatecznie otrzymuje się wzór:

$$\eta_{hm} = \frac{1}{1 + c_v \cdot 2\pi \frac{\mu \cdot n}{p} + c_p \frac{\rho \cdot n^2}{2p} \sqrt[3]{q^2} + c_p} \quad (5)$$

gdzie:

- c_p – współczynnik (zależy od rodzaju pompy, od jej gabarytów i sił, jakie obciążają łożyskowanie pompy);
- c_p – współczynnik (zasadniczo związany z wydajnością właściwą pompy, a także z wymiarami i położeniem powierzchni, które służą do zamiany energii mechanicznej na energię kinetyczną cieczy roboczej);
- c_v – współczynnik (zależy od rodzaju pompy);
- p_t – ciśnienie tłoczone;
- ... – pozostałe parametry jak dla sprawności objętościowej.

Ostatecznie, korzystając ze wzorów (1), (3) i (5), otrzymuje się równanie opisujące sprawność całkowitą:

$$\eta_c = \frac{1 - c_\mu \frac{p}{2\pi \mu n} - c_r \frac{1}{n} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \sqrt[3]{q^{-1}}}{1 + c_v \cdot 2\pi \frac{\mu \cdot n}{p} + c_p \frac{\rho \cdot n^2}{2p} \sqrt[3]{q^2} + c_p} \quad (6)$$

W opracowaniu za funkcje uznano (η_v), (η_{hm}) i (η_c), natomiast za zmienne decyzyjne przyjęto parametry: M , n , p_t , Q_{rz} . Przedstawione postępowanie ma sens z punktu widzenia zastosowania pompy zębatej z podciętym zębem w różnych układach, wykazania dokładności obliczeń matematycznych i poprawności, a także wyznaczenia rozbieżności obliczeniowych, wynikających z różnych algorytmów stosowanych w projektowaniu pompy zębatej:

- wyznaczenie maksymalnej sprawności hydrauliczno-mechanicznej przy założeniu dopuszczalnej sprawności objętościowej;
- wyznaczenie maksymalnej sprawności objętościowej przy założeniu dopuszczalnej sprawności hydrauliczno-mechanicznej;
- wyznaczenie maksymalnej sprawności całkowitej [3–7].

Możliwe jest podanie bardziej szczegółowych opisów analizowanych parametrów, przy uwzględnieniu umownego parametru wyrażonego wzorem [6, 7]:

$$k = \frac{n \cdot \mu}{p} \quad (7)$$

Takie podejście wymaga ciąglego uwzględniania konfliktu kryterialnego sprawności hydrauliczno-mechanicznej (η_{hm}) oraz sprawności objętościowej (η_v).

3. Optymalizacja dyskretna pompy zębatej z podciętą stopą zęba

W optymalizacji pompy zębatej obliczono sprawności: hydrauliczno-mechaniczną, objętościową oraz całkowitą [4]. Zoptymalizowanie sprawności pompy może przebiegać jako

metoda monokryterialna bądź wielokryterialna. Zakładając, że funkcją celu jest sprawność całkowita pompy, a poszukiwanymi parametrami są wartości parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych, optymalizację można przeprowadzić oddzielnie przy zmiennych parametrach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, szukając maksymalnej wartości sprawności [3, 5]. Sprawność maksymalna pompy o danej konstrukcji uzyskiwana jest poprzez dobór odpowiednich parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

4. Logiczne drzewa decyzyjne

Logiczne struktury drzewiaste w ujęciu decyzyjnym zawierają na każdym poziomie drzewa logiczną zmienną decyzyjną, przypisaną do danego parametru konstrukcyjnego i/lub eksploatacyjnego. Zmiany wartości arytmetycznych parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych są kodowane na gałązkach wartościami logicznymi kolejno od lewej do prawej strony dla poszczególnych zmiennych i przyjmują następujące wartości $p_t = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, M = 0, 1, 2, 3$ oraz dla Q_{rz} , $n = 0, 1, 2, 3, 4$ w każdej wiązce decyzyjnej. Projektowanie układu albo elementu można przeprowadzać według dowolnej kombinacji zmian dla parametrów, ale tylko drzewa decyzyjne z minimalną liczbą gałązek prawdziwych (oznaczone kolorem), bez gałązek izolowanych po uproszczeniu graficznym pełnych wiązek z góry na dół, opisują prawdziwą rangę ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych od najważniejszego na dole/korzeniu do najmniej ważnego na górze/wierzchołku drzewa [8]. Obowiązuje zasada, że na każdym poziomie/piętrze drzewa może występować tylko jedna zmienna decyzyjna [8, 9].

Do analizy badanych parametrów wybrano wartości arytmetyczne, które następnie zakodowano logicznymi zmiennymi decyzyjnymi dla potrzeb logicznych drzew decyzyjnych w optymalizacji dyskretniej pompy zębatej z podciętą stopą zęba [4]:

$$n = 500 \text{ [rpm]} \sim 0; n = 800 \text{ [rpm]} \sim 1;$$

$$n = 1000 \text{ [rpm]} \sim 2; n = 1500 \text{ [rpm]} \sim 3;$$

$$n = 2000 \text{ [rpm]} \sim 4;$$

$$p_t = 0 \text{ [MPa]} \sim 0; p_t = 5 \text{ [MPa]} \sim 1;$$

$$p_t = 10 \text{ [MPa]} \sim 2; p_t = 15 \text{ [MPa]} \sim 3;$$

$$p_t = 20 \text{ [MPa]} \sim 4; p_t = 25 \text{ [MPa]} \sim 5;$$

$$p_t = 28 \text{ [MPa]} \sim 6; p_t = 30 \text{ [MPa]} \sim 7;$$

$$Q_{rz} \in \langle 20,2; 21,1 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 0; Q_{rz} \in \langle 34,2; 34,9 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 1;$$

$$Q_{rz} \in \langle 43,3; 44,5 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 2; Q_{rz} \in \langle 65,5; 67,3 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 3;$$

$$Q_{rz} \in \langle 87,6; 89,3 \rangle \left[\frac{l}{\text{min}} \right] \sim 4;$$

$$M \in \langle 2,0; 47,0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 0; M \in \langle 77,0; 125,0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 1;$$

$$M \in \langle 138,0; 182,0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 2; M \in \langle 200,0; 259,0 \rangle \text{ [Nm]} \sim 3.$$

W kolejnym kroku uwzględniono zakodowanie logicznymi zmiennymi decyzyjnymi w kompleksowych wielowartościowych logicznych drzewach decyzyjnych. Przyjęto wartości liczbowe zakresu zmian poszczególnych sprawności: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$ (tabela 1) [4].

Wartości arytmetyczne i logiczne parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych będą identyczne także dla nowych wartości liczbowych zakresu zmian poszczególnych sprawności:

Tabela 1. Wartości arytmetyczne i logiczne parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych dla dawnych (*)[4] i nowych (**) wartości sprawności η_v , η_{hm} i η_c

n		p_t		Q_{rz}		M		N_h [kW]	N_m [kW]	η_v [%]	η_{hm} [%]	η_c [%]
dane		dane		dane		dane						
arytm. [rpm]	log.	arytm. [MPa]	log.	arytm. [l/min]	log.	arytm. [Nm]	log.					
500	0	≈0	0	21.1	0	2.0	0	0.00	0.10	94.6	0.0	0.0
	0	5	1	20.5	0	36.0	0	1.70	1.88	92.1	**98.0*	**90.3*
	0	10	2	20.3	0	77.0	1	3.38	4.03	91.3	**91.8*	**83.8
	0	15	3	20.2	0	116.0	1	5.05	6.07	90.9	**91.5*	**83.1
	0	20	4	20.2	0	156.0	2	6.73	8.17	90.9	**90.7*	**82.4
	0	25	5	20.5	0	200.0	3	8.53	10.47	92.1	**88.5	81.5
	0	28	6	20.6	0	218.0	3	9.60	11.41	92.5	**90.9*	**84.1
	0	30	7	20.7	0	236.0	3	10.34	12.36	93.0	**90.0*	**83.6
800	1	≈0	0	34.9	1	2.0	0	0.00	0.17	**98.0*	0.0	0.0
	1	5	1	34.7	1	38.0	0	2.88	3.18	**97.5*	**92.8*	**90.5*
	1	10	2	34.3	1	78.0	1	5.70	6.53	**96.2*	**90.6*	**87.2*
	1	15	3	34.2	1	118.0	1	8.53	9.89	**96.0*	**89.9*	**86.3*
	1	20	4	34.1	1	160.0	2	11.34	13.40	95.7	**88.4	**84.6
	1	25	5	34.5	1	202.0	3	14.38	16.92	**97.0*	**87.6	**85.0
	1	28	6	34.7	1	224.0	3	16.19	18.77	**97.5*	**88.5	**86.3*
	1	30	7	34.8	1	240.0	3	17.39	20.11	**97.8*	**88.5	**86.5*
1000	2	≈0	0	44.5	2	2.2	0	0.00	0.23	**99.9*	0.0	0.0
	2	5	1	44.1	2	38.0	0	3.66	3.98	**99.1*	**92.8*	**92.0*
	2	10	2	43.9	2	82.0	1	7.30	8.59	**98.7*	**86.2	**85.1
	2	15	3	43.4	2	124.0	1	10.83	12.99	**97.4*	**85.6	**83.4
	2	20	4	43.4	2	168.0	2	14.44	17.59	**97.4*	84.2	**82.1
	2	25	5	43.4	2	208.0	3	18.05	21.78	**97.4*	**85.1	**82.9
	2	28	6	43.4	2	234.0	3	20.22	24.50	**97.4*	84.7	**82.5
	2	30	7	43.3	2	249.0	3	21.62	26.08	**97.2*	**85.3	**82.9
1500	3	≈0	0	67.3	3	6.0	0	0.00	0.94	**100.9* ¹	0.0	0.0
	3	5	1	66.8	3	42.0	0	5.54	6.60	**100.0* ¹	84.0	**84.0
	3	10	2	66.5	3	84.0	1	11.06	13.19	**99.6*	84.1	**83.8
	3	15	3	66.1	3	125.0	1	16.51	19.63	**99.1*	84.9	**84.1
	3	20	4	65.5	3	172.0	2	21.80	27.02	**98.1*	82.3	80.7
	3	25	5	65.7	3	210.0	3	27.34	32.99	**98.4*	84.2	**82.9
	3	28	6	65.6	3	235.0	3	30.58	36.91	**98.2*	84.3	**82.8
	3	30	7	65.5	3	255.0	3	32.72	40.06	**98.1*	83.3	81.7
2000	4	≈0	0	89.3	4	8.0	0	0.00	1.68	**100.3* ¹	0.0	0.0
	4	5	1	89.0	4	47.0	0	7.39	9.84	**100.0* ¹	75.0	75.0
	4	10	2	88.3	4	94.0	1	14.69	19.69	**99.3*	75.2	74.6
	4	15	3	88.0	4	138.0	1	21.96	28.90	**98.8*	76.9	76.0
	4	20	4	87.6	4	182.0	2	29.17	38.12	**98.4*	77.8	76.5
	4	25	5	88.0	4	214.0	3	36.62	44.82	**98.8*	82.7	81.7
	4	28	6	87.9	4	241.0	3	40.98	50.47	**98.7*	82.2	81.2
	4	30	7	87.8	4	259.0	3	43.86	54.24	**98.6*	82.0	80.9

1. Wynika to z błędów przy zaokrągleniu

η_v bez zmian; $\eta_{hm} \geq 0,85$; $\eta_c \geq 0,82$ (**). Dlatego poprzednie wartości liczbowe zakresu zmian poszczególnych sprawności: $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$ oznaczono (*). W ten sposób w tabeli 1 można odróżnić bezpośrednio wierszowo prawdziwe (realizowalne) sprawności η_v i η_{hm} (równocześnie) oraz sprawność η_c . Ponadto widać w tabeli 1, że jeśli istnieją mniej rygorystyczne wymagania co do wartości sprawności, to większa liczba wierszy jest realizowalna. Wynika to także z faktu, że sprawność całkowita η_c jest zawsze iloczynem sprawności η_{hm} i η_v .

W celu uzyskania dokładnych wyników zostało rozrysowanych $4! = 24$ drzew decyzyjnych dla każdej badanej sprawności, przedstawiających wszystkie możliwe kombinacje zamiany zmiennych decyzyjnych na czterech piętrach. Następnie wybrany został układ optymalny, czyli drzewo z najmniejszą liczbą gałązek prawdziwych.

W ogólnej tabeli zostały przedstawione wszystkie zakodowane wartości arytmetyczne i logiczne dla M , n , p_t , Q_{rz} (tabela 1), a z nich wybrano i odpowiednio pogrupowano wartości dla poszczególnych sprawności: η_v , η_{hm} i η_c , podobnie jak w [2–5].

W efekcie końcowym kodowanie pozwoliło na naniesienie wartości zmiennych na wielowartościowe logiczne struktury drzewiaste, a następnie na otrzymanie odpowiednich konkluzji, podobnie jak w [8, 9].

Na podstawie danych z tabeli 1 sporządzono wynikowe drzewa logiczne (rysunki 1–3) dla wartości sprawności: η_v , η_{hm} i η_c [10, 11].

Można dowiedzieć, że zarówno dla sprawności objętościowej, sprawności hydrauliczno-mechanicznej, jak i sprawności całkowitej najlepszym układem w sensie minimum liczby gałązek prawdziwych jest układ pięter od korzenia $nQ_{rz}Mp_t$ oraz $Q_{rz}nMp_t$, gdzie $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,86$.

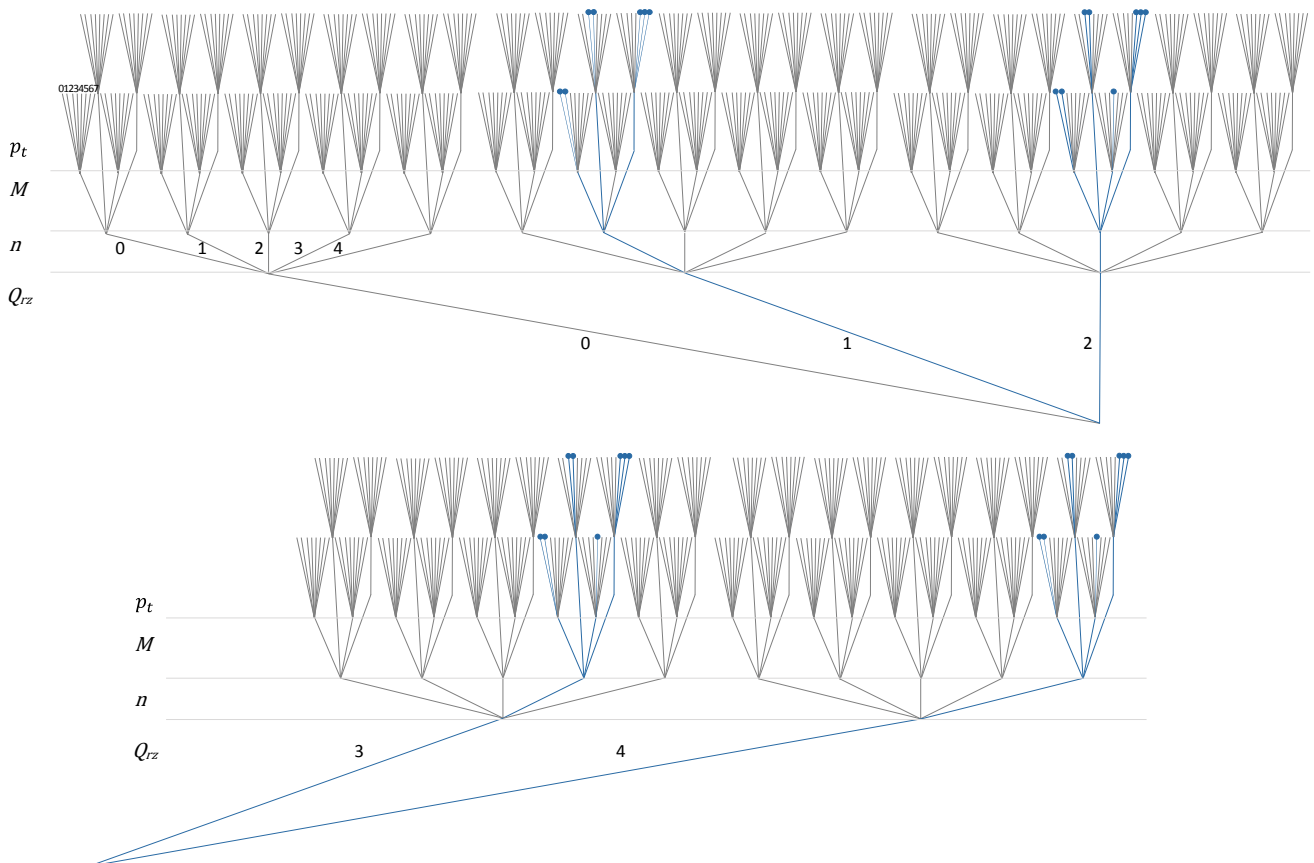
5. Nakładkowe drzewa decyzyjne

Wyszukanie maksymalnej sprawności objętościowej η_v przy spełnieniu dopuszczalnej sprawności hydrauliczno-mechanicznej η_{hm} albo maksymalnej sprawności hydrauliczno-mechanicznej η_{hm} przy spełnieniu dopuszczalnej sprawności objętościowej η_v , dotyczy tej samej pompy zębatej z podciętą stopą zęba. Dlatego też zamiast dodatkowego niezależnego liczenia sprawności całkowitej η_c sporządzić można wielowartościowe nakładkowe drzewa logiczne dla η_v , η_{hm} o układzie pięter identycznym do najlepszych oddzielnie dla η_v , η_{hm} (rys 4), podobnie jak w [8, 11].

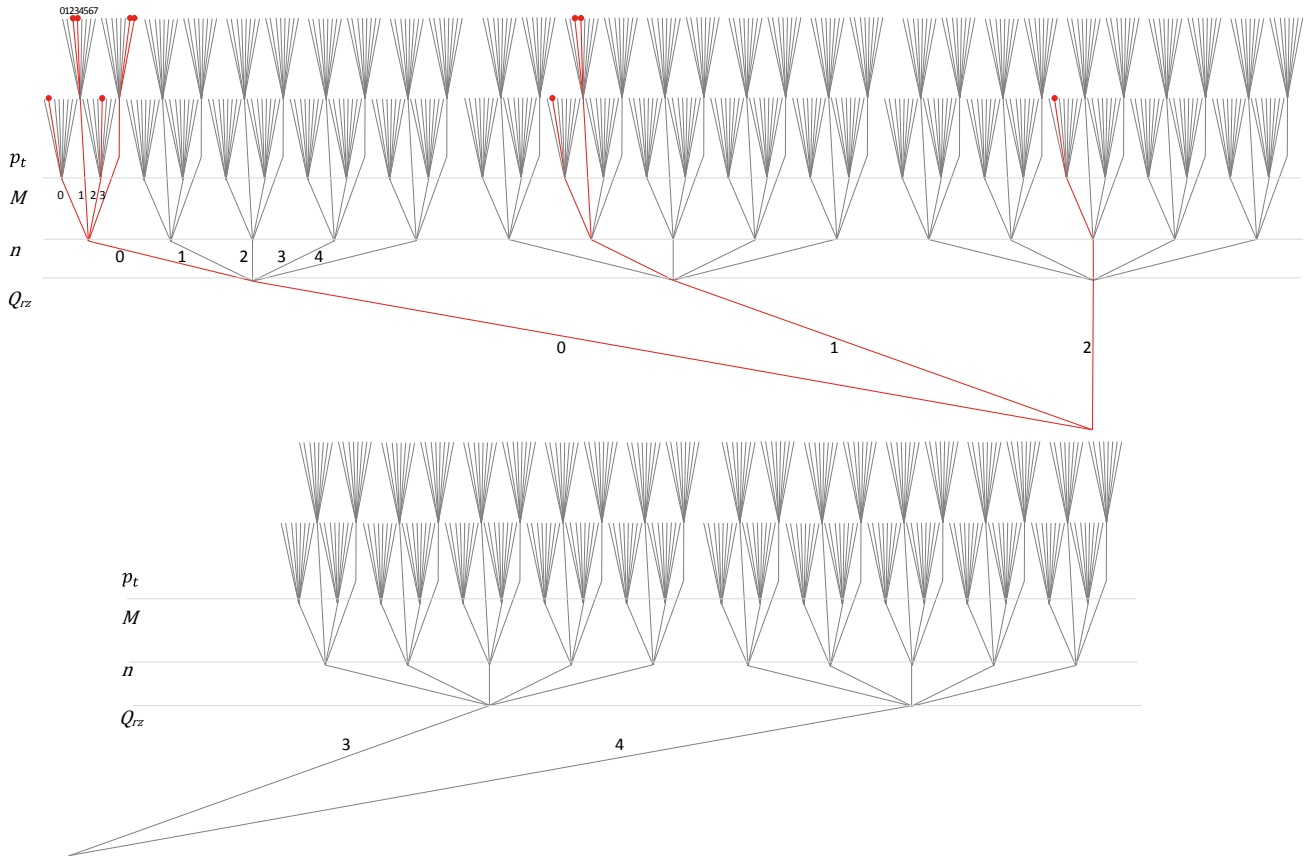
W opracowaniu przedstawiono drzewa logiczne dla η_c oraz równocześnie dla η_v i η_{hm} (nakładkowe).

Na rysunku 4 znaleźć można jednakowe ścieżki decyzyjne dla η_v , η_{hm} (jednocześnie) i porównać z η_c (rysunek 3), celem ostatecznego optymalnego wyboru konstrukcyjnego według tabeli 1 i w odpowiednim układzie pięter $nQ_{rz}Mp_t$ oraz $Q_{rz}nMp_t$.

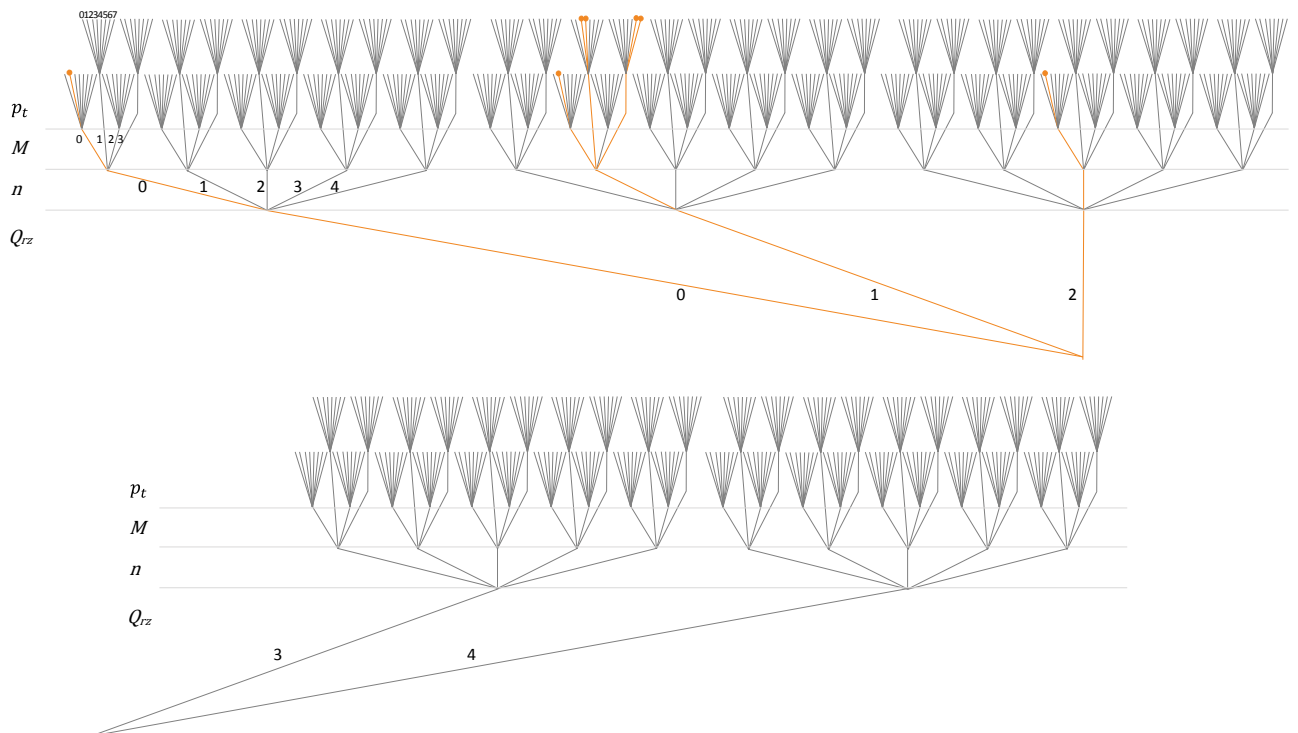
Na rysunku 5 przedstawiono logiczne drzewa decyzyjne dla nowych wartości liczbowych zakresu zmian: η_v bez zmian; $\eta_{hm} \geq 0,85$; $\eta_c \geq 0,82$ (**). Ponieważ w tej sytuacji występuje



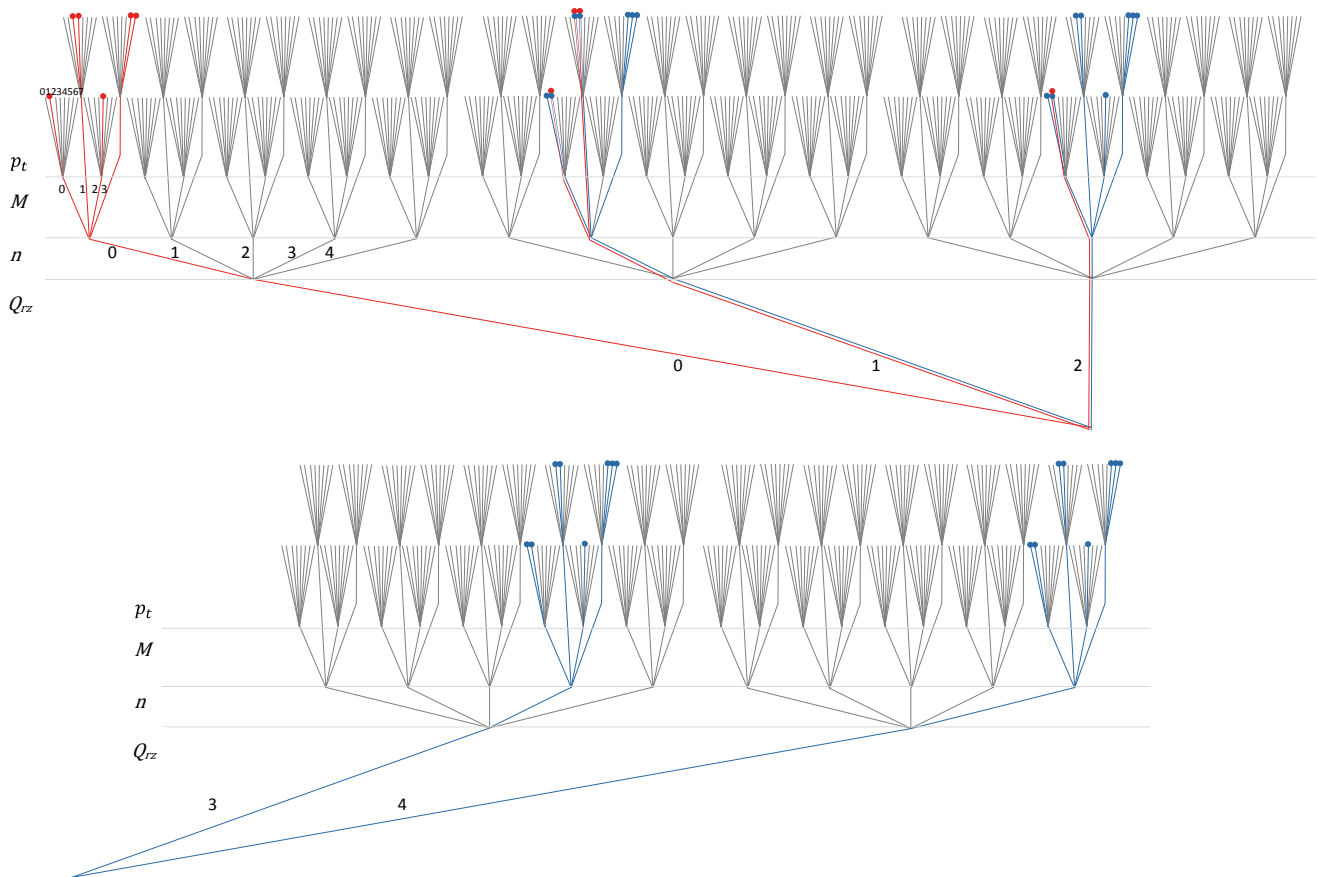
Rys. 1. Sprawność objętościowa • η_v (*)



Rys. 2. Sprawność hydrauliczno-mechaniczna • η_{hm} (°).



Rys. 3. Sprawność całkowita • η_c (°)



Rys. 4. Sprawność objętościowa • η_v i hydrauliczno-mechaniczna • η_{hm} (*).

więcej ścieżek prawdziwych (realizowalnych), to tym bardziej odgrywa rolę kryterium kompromisu w nakładkowych drzewach logicznych. Dlatego należy określić szczegółowe kryteria decyzyjne związane z optymalnymi decyzyjnymi drzewami logicznymi dla kryterium kompromisu. Wynika to także z faktu,

że w nakładkowych drzewach logicznych często występują ścieżki nakładkowe od korzenia na dole, ale nie dosłownie do wierzchołków na szczycie. W takiej sytuacji dodatkowo należy określić kryteria rangowania parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych w warunkach kompromisu.

reklama

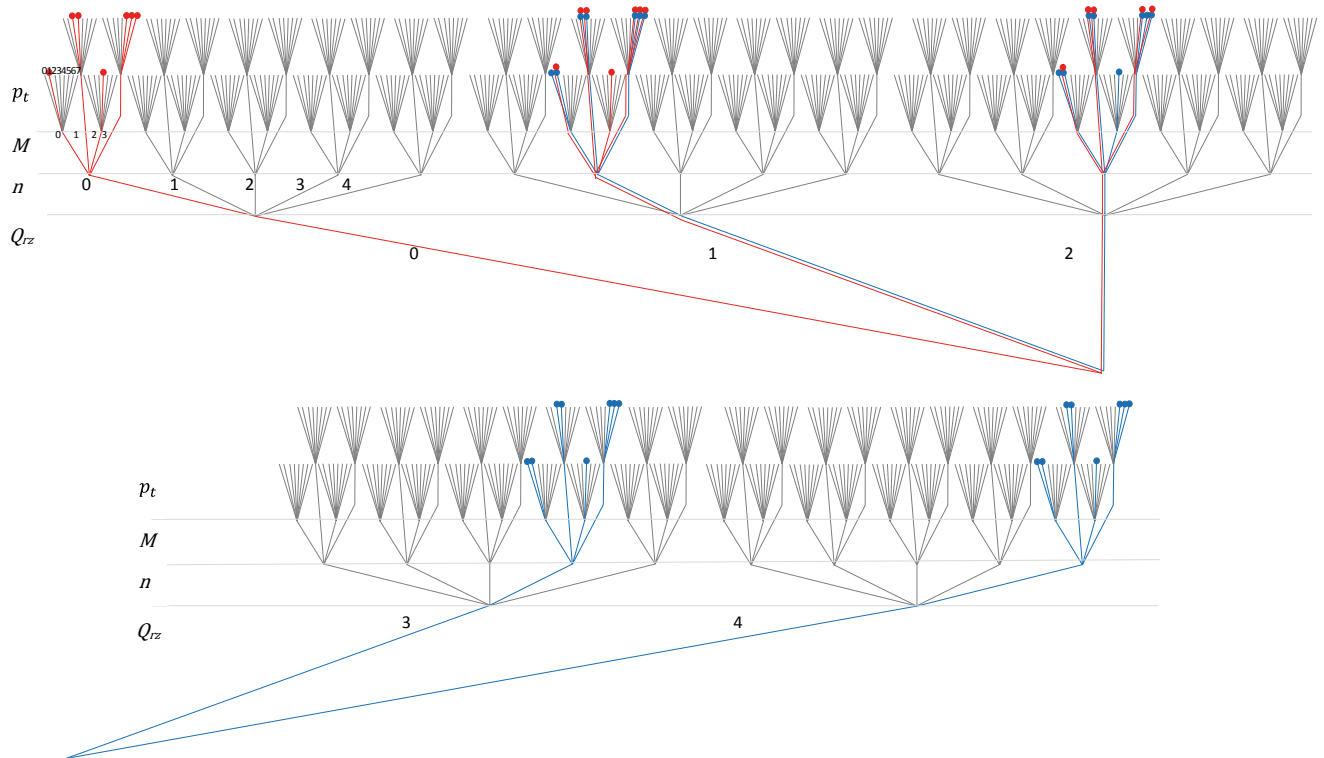
NOWIMEX®

NOWIMEX doradza w doborze i dostarcza produkty renomowanych firm z branży automatyki i elektromechaniki przemysłowej:

- VAHLE** – Systemy zasilania ruchomych odbiorników prądu.
- SCHLEGEL** – Tablicowy osprzęt sterowniczo-sygnalizacyjny.
- LEAB** – Systemy zasilania pojazdów ratowniczych, pożarniczych i medycznych w prąd i sprężone powietrze.
- A.M.I.** – Panele sygnalizacyjne i alarmowe.
- TEXELCO** – Sygnalizatory świetlne i dźwiękowe.
- HUGRO** – Dławice do kabli.
- BREVETTI** – Tworzywowe i stalowe przewadniki kabli.
- CATTRON** – Przemysłowe systemy zdalnego sterowania radiowego.
- MICRO DETECTORS** – Szeroka gama czujników.
- MARECHAL** – Wtykowe złącza przemysłowe i dekontaktry (z wbudowaną funkcją rozłączeniową).

www.nowimex.com.pl
info@nowimex.com.pl





Rys. 5. Nakładkowe drzewo logiczne dla sprawności objętościowej • η_{lv} i hydrauliczno-mechanicznej • η_{Jm} dla nowych wartości liczbowych (**)

Tabela 2. Kombinacje prawdziwe (realizowalne) dla ustalonych dwóch kryteriów

Kryterium I																	
X_1	X_2	X_3	X_1	X_3	X_2	X_2	X_1	X_3	X_2	X_3	X_1	X_3	X_1	X_2	X_3	X_2	X_1
0	0	2	0	2	0	0	0	2	0	2	0	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	2	0
0	2	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
0	2	1	0	1	2	0	1	2	0	2	1	0	1	1	0	1	1
0	2	2	0	2	2	1	0	0	1	0	0	1	0	2	1	2	0
1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	2	1	2	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
1	1	0	1	0	1	2	0	1	2	1	0	2	0	2	2	2	0
1	1	1	1	1	1	2	0	2	2	2	0	2	1	0	2	0	1

Kryterium II																	
X_1	X_2	X_3	X_1	X_3	X_2	X_2	X_1	X_3	X_2	X_3	X_1	X_3	X_1	X_2	X_3	X_2	X_1
1	1	2	1	2	1	0	2	1	0	1	2	0	1	2	0	2	1
1	2	0	1	0	2	1	1	2	1	2	1	0	2	1	0	1	2
1	2	1	1	1	2	1	2	0	1	0	2	2	2	1	2	1	2
1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1
2	0	1	2	1	0	1	2	2	1	2	2	1	2	0	1	0	2
2	1	0	2	0	1	2	1	0	2	0	1	1	2	1	1	1	2
2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2
2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1
2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1
1	1	2	1	2	1	0	2	1	0	1	2	0	1	2	0	2	1

reklama



Oto STAUFF Polska

Działając pod marką STAUFF zdobyliśmy pozycję międzynarodowego lidera w pracach rozwojowych, produkcji i dostawach części od systemów rur i układów hydraulicznych.

Systemy Mocowania



Systemy Pomiarowe



Technika Filtracji



Diagtronics



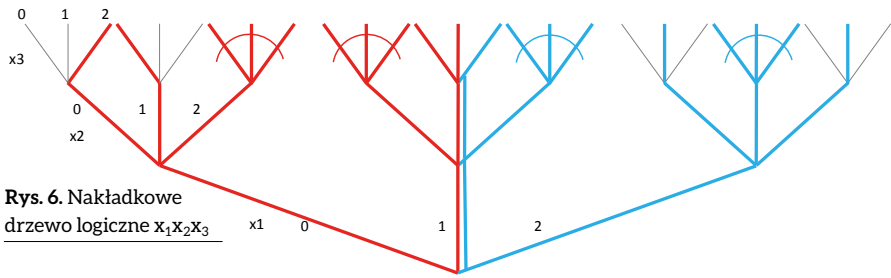
Akcesoria Hydrauliczne



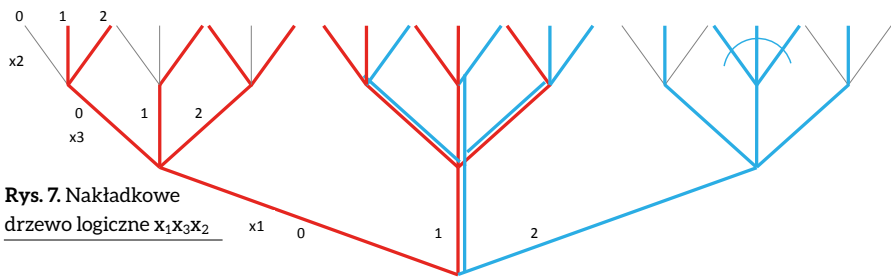
Zawory Kulowe



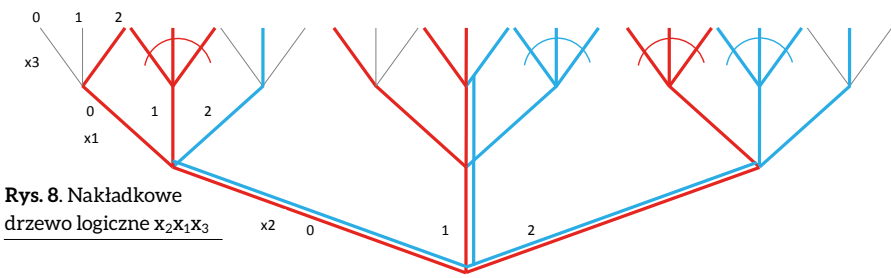
Złącza Hydrauliczne



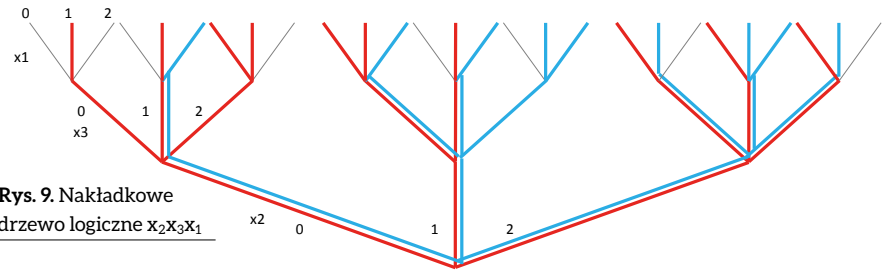
Rys. 6. Nakładkowe drzewo logiczne $x_1x_2x_3$



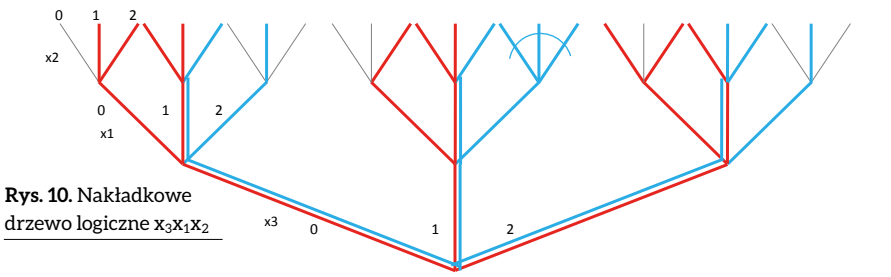
Rys. 7. Nakładkowe drzewo logiczne $x_1x_3x_2$



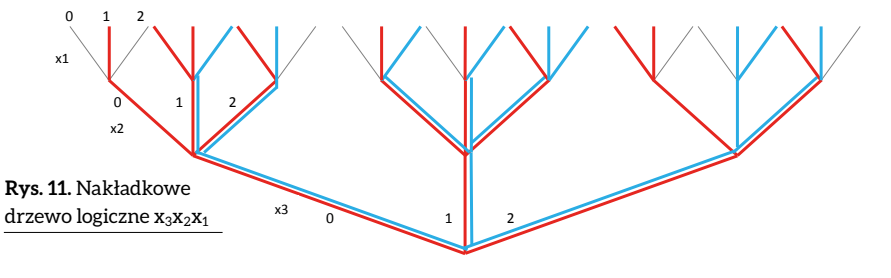
Rys. 8. Nakładkowe drzewo logiczne $x_2x_1x_3$



Rys. 9. Nakładkowe drzewo logiczne $x_2x_3x_1$



Rys. 10. Nakładkowe drzewo logiczne $x_3x_1x_2$



Rys. 11. Nakładkowe drzewo logiczne $x_3x_2x_1$



NOWOŚĆ!
STAUFF
Connect

Technologia Złączy Rurowych od STAUFF



STAUFF Polska Sp. z o.o.
Miszewko 43 A • 80-297 Banino
Tel.: 058 660 11 60 • Fax: 058 629 79 52
sales@stauff.pl

www.stauff.pl

6. Przykłady wyznaczania i redukcji decyzyjnej nakładkowych drzew logicznych

Niech będą dane dwa kryteria z trzema identycznymi atrybutami (tabela 2), które posiadają ustalone kombinacje prawdziwe (realizowalne) dla wszystkich permutacji piętrowych decyzyjnych drzew logicznych (rys. 6–11). Każde kryterium oddzielnie posiada optymalne drzewo logiczne dla hierarchii piętrowej $x_1x_2x_3$, gdyż po dozwolonych odcięciach wiązkowych bez gałązek izolowanych z góry na dół istnieje najmniejsza liczba gałązek. Taka sytuacja oznacza jednocześnie prawidłowe wyznaczanie rangi ważności atrybutów x_1 , x_2 , x_3 od najważniejszego na dole x_1 do najmniej ważnego na górze x_3 . Można zauważyć, że istnieje ścieżka kompromisu $x_1x_2x_3 \equiv (11\bullet)$, gdzie kropka (\bullet) oznacza brak gałązki bez uproszczenia.

Gdyby zrezygnować z wyznaczania rangi ważności atrybutów, to istniejące drzewa logiczne nie będą optymalne w sensie minimum liczby gałązek prawdziwych dla danego zbioru kryterialnego, ale wtedy istnieje więcej ścieżek/podścieżek na dowolnym nakładkowym drzewie logicznym opisującym kompromis.

7. Wnioski

Nakładkowe drzewa decyzyjne są niezależną metodą projektowania wobec innych kompleksowych metod projektowania. Wspólne ścieżki oznaczają spełnienie kompromisu w celu uzyskania optymalnego rozwiązania według ustalonego zbioru kryterialnego. Potencjalne rozbieżności obliczeniowe przeważnie wynikają z niewłaściwych zaokrążeń arytmetycznych dla sprawności η_{hm} , η_v , η_c .

W rozpatrywanym przypadku dla pompy z podciętą stopą zęba optymalnymi rozwiązaniami są drzewa o kolejności pięter: $Q_{rz}nMp_t$ oraz $nQ_{rz}Mp_t$ i odpowiednie nakładkowe drzewa decyzyjne różniące się kilkoma gałązkami na najwyższych piętrach drzew dla dawnych sprawności $\eta_v \geq 0,96$; $\eta_{hm} \geq 0,89$; $\eta_c \geq 0,82$.

Na rysunku został przedstawiony tylko układ $Q_{rz}nMp_t$ dla sprawności η_{hm} , η_v , η_c , ponieważ drzewa dla układu $nQ_{rz}Mp_t$ wyglądają praktycznie tak samo, gdyż Q_{rz} i n przyjmują takie same wartości (tabela 1).


Podobna analiza logicznych drzew nakładkowych została dokonana w [8]. Także wyznaczono niezależnie sprawność całkowitą oraz wykonano drzewo nakładkowe dla sprawności hydrauliczno-mechanicznej η_{hm} i sprawności objętościowej η_v , a następnie dokonano porównania z drzewem decyzyjnym dla sprawności całkowitej η_c .

W przypadkach bardziej złożonych konieczne jest opracowanie specjalnego algorytmu na temat wyznaczania optymalnych nakładkowych drzew logicznych z uwzględnieniem rangi ważności parametrów konstrukcyjnych i/lub eksploatacyjnych. Wynika to z faktu istnienia różnych szczegółowych właściwości hydraulicznych pomp zębatych, opisanych szeroko w dostępnej literaturze [Cieśliski R.A., Kollek W., Kudźma Z., Maga K., Osiński P., Rutański J., Stosiak M., Warzyńska U., i in.]. Jako przykład można podać ustalone konstrukcje eksperymentalne, które w pełnym zakresie prędkości obrotowych posiadały najwyższą sprawność objętościową. Ponadto w pełnym zakresie prędkości obrotowych dla takich konstrukcji można było wyznaczyć zakres siodłowy obniżenia sprawności objętościowej, którego minimum zawiera się w ustalonym zakresie ciśnień,

ale skala występowania takiego zjawiska rośnie wraz ze spadkiem prędkości obrotowej. Chwilowe przedziałowe obniżenie sprawności może wynikać z doszczelnienia pompy przez kompensację powyżej odpowiedniego ciśnienia granicznego [12].

Literatura

- [1] DEPTUŁA A.: *Coefficient of the structure complexity for multi-valued decision logic trees*. XLI Konf. Zast. Mat., Zakopane 2012, Inst. Mat. PAN, Warszawa 2012.
- [2] DEPTUŁA A., PARTYKA M.A.: *Analiza porównawcza dokładności w procesie wyznaczania rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych pompy zębatej z podciętą stopą zęba*. Innovations in Management and Production Engineering, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2015.
- [3] OSIŃSKI P.: *Impact of the tooth root undercutting on hydraulic and acoustic properties of gear pump*; Raport PRE nr 14/2005; Politechnika Wroclawska, Wrocław 2005.
- [4] OSIŃSKI P., DEPTUŁA A., PARTYKA M.A.: *Discrete optimization of a gear pump after tooth root undercutting by means of multi-valued logic trees*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 13, Issue 4, December 2013.
- [5] DEPTUŁA A., PARTYKA M.A.: *Discrete optimization of a gear pump after tooth undercutting by means of complex multi-valued logic trees*. XVI Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Zakopane 2013, Pol. Towarz. Zarz. Prod. PTZP 2013.
- [6] KOLLEK W.: *Pompy zębate*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1996.
- [7] KOLLEK W.: *Wpływ parametrów eksploatacyjnych na sprawność pomp zębatych*. „Sterowanie i Napęd Hydrauliczny” 3/1983.
- [8] GRABOWSKI C., PARTYKA M.A.: *Nakładkowe drzewa logiczne dla kryterium kompromisu w optymalizacji dyskretnej na przykładzie pomp zębatych*. „Górnictwo Odkrywkowe” 4–5/2008.
- [9] PARTYKA M.A.: *Optymalizacja dyskretna pompy wirowo-śmigłowej w ruchu turbinowym – zastosowanie wielowartościowych drzew logicznych*. „Napędy i Sterowanie” 1/2004.
- [10] PARTYKA M.A., NATORSKA M.: *Dyskretna optymalizacja pompy zębatej z podciętą stopą zęba za pomocą nakładkowych drzew logicznych*. „Napędy i Sterowanie” 7–8/2017.
- [11] PARTYKA M.A., NATORSKA M.: *Discrete Optimization of a Gear Pump after Tooth Root Undercutting by Means of Multi-Dimensional Logic Functions*. Wyd: Applied Sciences, 2020, 10, 4682, Manuscript ID: applsci-835857. DOI: 10.3390/app10134682.
- [12] OSIŃSKI P.: *Wysokosprawnościowe pompy zębate*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.

 prof. dr hab. Marian A. Partyka jest profesorem na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej; mgr inż. Maria Natorka jest asystentką na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej; e-mail: m.natorka@po.edu.pl

Największe Targi Odnawialnych
Źródeł Energii w Polsce

enex



28-29.04.2021

Kielce

Zastosowanie komputerowego wspomaganie wyznaczania rangi ważności parametrów z funkcją zmienna zastępcza oraz warunkowość na rzeczywistym przykładzie ze zmiennymi zależnymi o podobnej ważności

Agnieszka Tiszbierek

1. Wprowadzenie

Współcześnie istnieje wiele złożonych układów automatyki i sterowania, których parametry są od siebie zależne, a ich zależność w znaczącym stopniu wpływa na jakość lub wydajność pracy danego urządzenia. Interakcyjność zmiennych nie jest więc sprawą obojętną w procesie projektowania i konstruowania maszyn, a odpowiednio położony nacisk na „doszlifowanie” konkretnej zmiennej w procesie ma znaczący wpływ na późniejsze efekty pracy tworzonego układu. Dlatego też tak istotny staje się proces ustalania rangi ważności parametrów badanego urządzenia. Jednak i w tym procesie nie wolno zapominać o zależności zmiennych wynikających np. z praw fizyki czy ułożenia elementów maszyny. Czas poprawiania, testowania i udoskonalania urządzenia powinien iść zatem w parze z poprawnym procesem wyznaczania rangi ważności poszczególnych parametrów, nawet jeśli różni się ona minimalnie. By proces ten był skuteczny i poprawny, należy zabezpieczyć nierozzerwalność zależnych zmiennych. Sam proces był złożony i skomplikowany obliczeniowo, zatem powstał pomysł oprogramowania algorytmu i utworzenia programu komputerowego [1]. Jak się okazało, zastosowanie programu znacznie ułatwiło proces obliczeniowy, jednak zależność zmiennych wymusiła wprowadzenie takich funkcjonalności, jak zmienna zastępcza i warunkowość, które pomogły uchronić przed rozdzieleniem zmiennych zależnych.

2. Nowe funkcjonalności programu komputerowego: zmienna zastępcza i warunkowość

Pierwszą z wymienionych nowych funkcjonalności programu jest możliwość utworzenia jednej lub kilku zmiennych zastępczych. Program sam – automatycznie – zakoduje wybrane zmienne w nową zmienną. Po wybraniu i zaznaczeniu odpowiednich parametrów program sam ustala nową wartościowość zmiennej zastępczej oraz przydziela danej wartości kodowej odpowiednio ułożone wiersze z wartościami parametrów wewnętrznych (np. 000 – 0). Zabieg ten nie tylko skraca czas kodowania, ale także zabezpiecza przed pojawieniem się błędów wynikającego z nieuwagi człowieka lub mnogości zmiennych oraz ich znacznej wielowartościowości. Po wczytaniu wartości parametrów oraz ustaleniu składu zmiennej zastępczej można, klikając odpowiedni przycisk, uruchomić proces

Streszczenie: Artykuł opisuje problem złożoności obliczeniowej na rzeczywistym przykładzie ze zmiennymi zależnymi o podobnej ważności, do rozwiązania którego zastosowano opracowany program komputerowy. Program bazuje na decyzyjnej wersji algorytmu Quine’a-McCluskeya minimalizacji wielowartościowych funkcji logicznych i oblicza rangę ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych badanego układu. Ponadto program posiada możliwość zastosowania w obliczeniach zmiennej zastępczej, a także nałożenia zależności warunkowej. W badanym przypadku zastosowano obie metody, by uprościć proces obliczeniowy oraz otrzymać bardziej przystępne w analizie wyniki. Dane wykorzystane w artykule to wyniki badań występowania wybranych objawów choroby tarczycy.

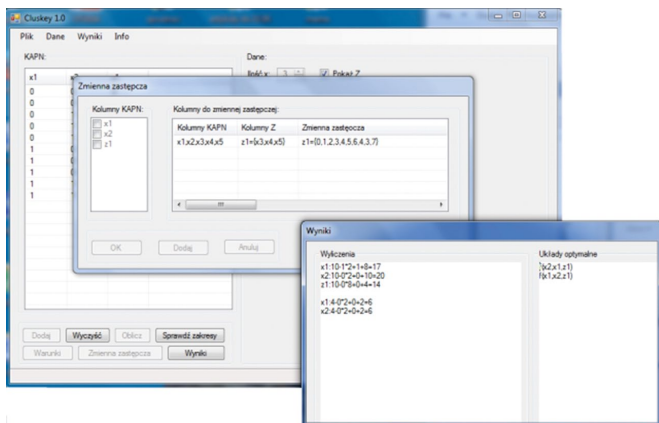
Słowa kluczowe: algorytm Quine’a-McCluskeya minimalizacji indywidualnych funkcji logicznych, ranga ważności zmiennych decyzyjnych, warunkowość zmiennych oraz zmienna zastępcza

APPLICATION OF THE COMPUTATION OF PARAMETER IMPORTANCE RANK WITH FUNCTION SUBSTITUTE VARIABLE AND CONDITIONS TO A REAL EXAMINATION OF DEPENDENT VARIABLES OF RELEVANT VARIABLES

Abstract: Synopsis: The paper describes the calculation complexity using a real life example with dependent variables with similar importance, for solving which was a computer programme developed. The programme is based on the decision version of the Quine’a-McCluskey algorithm for minimizing multivalued logic functions and calculating the importance rank of constructiv-exploativ parameter of the researched system. Furthermore the programme has the ability to use a substitute variable during calculations, and to implement a condition dependency. In the researched instance both methods were implemented as to simplify the calculations and receive more accessible results for analysis. The data used in the example are the results of tests for chosen thyroid disease symptoms.

Key words: algorithm Quine-McCluskey for minimizing individual logic functions, decision variables importance rank, conditionality of variables and substitute variable

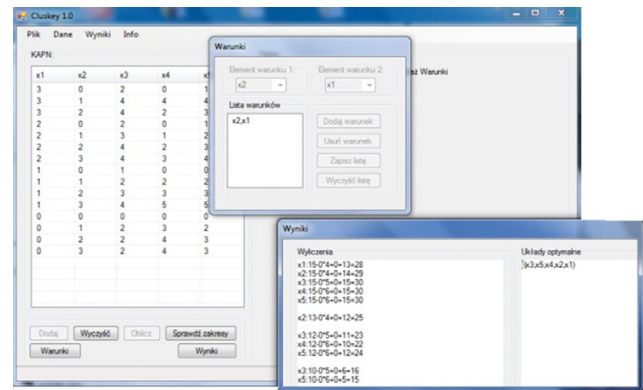
obliczeniowy. Po kliknięciu w przycisk *Oblicz* w kilka sekund otrzymywane jest potwierdzenie pomyślnego zakończenia obliczeń, a po uruchomieniu przycisku *Wyniki* w osobnym oknie pojawiły się odpowiednie dane. Prócz obliczeń pośrednich (etapowych) widnieją na nim także układy optymalne. W programie zmienna zastępcza prócz nazwy „z” otrzymuje kolejny numer (np. z_1), co wynika z możliwości zakodowania większej liczby zmiennych zastępczych. Funkcjonalność *Zmienna zastępcza* posiada możliwość podglądu „wnętrza” zmiennych zastępczych po wykonaniu obliczeń. Wystarczy zaznaczyć kwadracik przy nazwie zmiennej zastępczej, by uruchomić nowe okno, w którym zobrazowany jest nie tylko skład zmiennej zastępczej, ale i sposób jej kodowania, dzięki czemu można skonfrontować wyniki czy też sprawdzić poprawność wybrania parametrów do zakodowania zmiennych zastępczych. Proces obliczeniowy w przypadku tej funkcjonalności bazuje na tym samym algorytmie programu, jak jego wersja podstawowa [1]. Po zakodowaniu zmiennych zastępczych są one traktowane jak „nowe” parametry (zmienne wchodzące w ich skład są kasowane z tabeli pamięci parametrów) i następuje klasyczny proces obliczeniowy z wyświetleniem po zakończeniu ostatecznych wyników [2].



Rys. 1. Widok programu z oknem wynikowym oraz oknem zmiennej zastępczej

Kolejną nową funkcjonalnością jest możliwość narzucenia odpowiednich warunków występowania po sobie parametrów. Funkcjonalność ta jest pod przyciskiem *Warunki*, a po jej włączeniu pojawia się dodatkowe okno z listą parametrów i specjalnym wyborem, za pomocą którego należy zaznaczyć, które parametry i w jakim układzie powinny się pojawić po sobie w układach optymalnych. Również i w tym przypadku występuje możliwość podglądu narzuconych warunków po wykonaniu obliczeń. Algorytm programu, przy funkcji warunków, działa podobnie jak wersja podstawowa programu, z innowacją, którą jest każdorazowe sprawdzenie, czy nowo wyliczone minimum nie wchodzi w skład narzuconego warunku (jest przynajmniej drugim od końca parametrem).

Jeśli tak by się zdarzyło, to należy je odrzucić i znaleźć nowe. Natomiast jeśli minimum okaże się parametr znajdujący się na końcu narzuconego warunku, pozostałe parametry należy ułożyć bez dodatkowych obliczeń w narzuconym ciągu, a dopiero potem przejść do kolejnych etapów obliczeniowych [2].



Rys. 2. Widok programu z oknem wynikowym oraz oknem warunków

3. Problem złożoności obliczeniowej przy zmiennych zależnych o podobnej ważności

Opisanym w artykule problemem jest złożoność obliczeniowa pojawiająca się w procesie wyznaczania rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych o podobnej ważności. Dodatkowym utrudnieniem jest występująca zależność między parametrami badanego układu. Dobrym przykładem takiej zależności, a także minimalnej różnicy ważności, jest układ objawów występujących przy chorobie tarczycy. Objawy te zostały zebrane w czasie badań i oznaczone odpowiednimi wartościami x . Parametry x są dwuwartościowe (1 oznacza występowanie objawu, a 0 jego brak) i układają się w osiem zmiennych – $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ – zapisanych numerycznie w tabeli 1. Wykonano podstawowe obliczenia początkowo za pomocą zbiorów przybliżonych [3], a następnie za pomocą dwuwartościowych decyzyjnych drzew logicznych [4].

Tabela 1. Numeryczny zapis kodowania zmiennych

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
0	1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0
1	1	0	1	0	1	1	0
0	1	1	1	0	1	1	0

Obie metody wykazały, że parametry x_1 i x_3 mają najmniejszą rangę ważności w porównaniu do pozostałych parametrów. Wyniki te zostały potwierdzone komputerowymi obliczeniami: $x_1: 5 - 1 * 2 + 1 + 3 = 7$; $x_3: 4 - 0 * 2 + 0 + 3 = 7$;

$$x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8: 4 - 0 * 2 + 0 + 4 = 8 [5].$$

Jednak dogłębniejsza analiza otrzymanych wyników wykazała, że wewnątrz obliczeń etapowych pojawiają się pewne zależności pomiędzy parametrami. Poszczególne wyniki podetapów obliczeniowych dla danych zmiennych różniły się o 1 (w zależności od tego, dla jakiego parametru wykonano obliczenia, a także po jakim parametrze była wykonana redukcja wcześniejszego etapu), jednak analizowany problem zawiera

Tabela 2. Logiczne przekształcenia (znak "–" z lewej strony oznacza iloczyn logiczny, który powstał m.in. z uprzedniego uproszczenia zgodnie z aksjomatem algebry Boole'a)

Logiczne przekształcenia względem x_1									
Etap I					Etap II				
V									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
t_1	0	1	0	0	1	0	0	1	\underline{V}
t_2	0	0	0	1	1	0	0	1	\underline{V}
t_4	0	1	0	1	0	1	1	0	V
t_3	1	1	0	1	0	1	1	0	V
t_5	0	1	1	1	0	1	1	0	\underline{V}
Logiczne przekształcenia względem x_3									
Etap I					Etap II				
V									
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
t_1	0	1	0	0	1	0	0	1	\underline{V}
t_2	0	0	0	1	1	0	0	1	\underline{V}
t_4	0	1	0	1	0	1	1	0	V
t_3	1	1	0	1	0	1	1	0	\underline{V}
t_5	0	1	1	1	0	1	1	0	V

Tabela 3 a. Etapowe obliczenia dla wybranych układów optymalnych (z układem $\dots x_3 x_1$)

$x_1: 5 \cdot 1^2 + 1 + 3 = 7$ $x_2: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$ $x_3: 5 \cdot 1^2 + 1 + 3 = 7$ $x_4: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$ $x_5: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$ $x_6: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$ $x_7: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$ $x_8: 5 \cdot 0^2 + 0 + 5 = 10$					
$x_2: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$ $x_3: 4 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 7$ $x_4: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$ $x_5: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$ $x_6: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$ $x_7: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$ $x_8: 4 \cdot 0^2 + 0 + 4 = 8$					
$x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$					
$x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_8: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$
$x_5: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_6: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_5: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_6: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_7: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$
\dots $x_6: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_6: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 3 = 6$
\dots $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_7: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$ $x_8: 2 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 4$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_6: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_5: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$	\dots $x_2: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$ $x_4: 3 \cdot 0^2 + 0 + 2 = 5$
$x_8 x_7 x_6 x_5 x_4 x_2 x_3 x_1$	$x_7 x_8 x_6 x_5 x_4 x_2 x_3 x_1$	$x_6 x_2 x_4 x_7 x_8 x_5 x_3 x_1$	$x_5 x_2 x_4 x_7 x_8 x_6 x_3 x_1$	$x_4 x_2 x_5 x_6 x_8 x_7 x_3 x_1$	$x_2 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_3 x_1$

Tabela 3 b. Etapowe obliczenia dla wybranych układów optymalnych (z układem x_1x_3)

$x1:5-1^*2+1+3=7$ $x2:5-0^*2+0+5=10$ $x3:5-1^*2+1+3=7$ $x4:5-0^*2+0+5=10$ $x5:5-0^*2+0+5=10$ $x6:5-0^*2+0+5=10$ $x7:5-0^*2+0+5=10$ $x8:5-0^*2+0+5=10$					
$x1:4-0^*2+0+3=7$ $x2:4-0^*2+0+4=8$ $x4:4-0^*2+0+4=8$ $x5:4-0^*2+0+4=8$ $x6:4-0^*2+0+4=8$ $x7:4-0^*2+0+4=8$ $x8:4-0^*2+0+4=8$					
$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$					
$x4:3-0^*2+0+2=5$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+2=5$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$
$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x7:2-0^*2+0+2=4$ $x8:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x7:2-0^*2+0+2=4$ $x8:2-0^*2+0+2=4$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+3=6$ $x4:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+2=5$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x2:3-0^*2+0+2=5$ $x5:3-0^*2+0+3=6$ $x6:3-0^*2+0+3=6$ $x7:3-0^*2+0+3=6$
$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x7:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x7:2-0^*2+0+2=4$	$x4:3-0^*2+0+2=5$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x4:3-0^*2+0+2=5$ $x7:3-0^*2+0+3=6$ $x8:3-0^*2+0+3=6$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x8:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$ $x7:2-0^*2+0+2=4$
$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$	$x7:2-0^*2+0+2=4$ $x8:2-0^*2+0+2=4$	$x7:2-0^*2+0+2=4$ $x8:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$	$x5:2-0^*2+0+2=4$ $x6:2-0^*2+0+2=4$
x6x5x7x8x4x2x1x3	x5x6x7x8x2x4x1x3	x7x8x4x2x6x5x1x3	x8x7x4x2x5x6x1x3	x5x6x8x2x4x7x1x3	x6x5x7x2x4x8x1x3

Tabela 4. Tabela z układami optymalnymi dla badanego przykładu bez zastosowania warunków i zmiennych zastępczych

Układy optymalne z ... x_3x_1					
z ... $x_2x_3x_1$	z ... $x_4x_3x_1$	z ... $x_5x_3x_1$	z ... $x_6x_3x_1$	z ... $x_7x_3x_1$	z ... $x_8x_3x_1$
f(x8,x7,x6,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x7,x6,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x7,x6,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x8,x7,x5,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x8,x6,x5,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x7,x6,x5,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x7,x8,x6,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x8,x6,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x8,x6,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x7,x8,x5,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x6,x8,x5,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x6,x7,x5,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x8,x6,x7,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x6,x7,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x6,x7,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x8,x5,x7,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x8,x5,x6,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x7,x5,x6,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x6,x8,x7,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x8,x7,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x6,x8,x7,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x5,x8,x7,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x5,x8,x6,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x5,x7,x6,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x7,x6,x8,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x6,x8,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x6,x8,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x7,x5,x8,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x6,x5,x8,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x6,x5,x7,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x6,x7,x8,x5,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x7,x8,x5,x2,x4,x3,x1)	f(x6,x7,x8,x4,x2,x5,x3,x1)	f(x5,x7,x8,x4,x2,x6,x3,x1)	f(x5,x6,x8,x4,x2,x7,x3,x1)	f(x5,x6,x7,x4,x2,x8,x3,x1)
f(x8,x7,x5,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x7,x5,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x7,x6,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x8,x7,x5,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x8,x6,x5,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x7,x6,x5,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x7,x8,x5,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x8,x5,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x8,x6,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x7,x8,x5,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x6,x8,x5,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x6,x7,x5,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x8,x5,x7,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x5,x7,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x6,x7,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x8,x5,x7,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x8,x5,x6,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x7,x5,x6,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x5,x8,x7,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x8,x7,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x6,x8,x7,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x5,x8,x7,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x5,x8,x6,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x5,x7,x6,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x7,x5,x8,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x5,x8,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x6,x8,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x7,x5,x8,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x6,x5,x8,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x6,x5,x7,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x5,x7,x8,x6,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x7,x8,x6,x2,x4,x3,x1)	f(x6,x7,x8,x2,x4,x5,x3,x1)	f(x5,x7,x8,x2,x4,x6,x3,x1)	f(x5,x6,x8,x2,x4,x7,x3,x1)	f(x5,x6,x7,x2,x4,x8,x3,x1)
f(x8,x6,x5,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x6,x5,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x7,x4,x2,x6,x5,x3,x1)	f(x8,x7,x4,x2,x5,x6,x3,x1)	f(x8,x6,x4,x2,x5,x7,x3,x1)	f(x7,x6,x4,x2,x5,x8,x3,x1)
f(x6,x8,x5,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x8,x5,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x8,x4,x2,x6,x5,x3,x1)	f(x7,x8,x4,x2,x5,x6,x3,x1)	f(x6,x8,x4,x2,x5,x7,x3,x1)	f(x6,x7,x4,x2,x5,x8,x3,x1)
f(x8,x5,x6,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x8,x5,x6,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x7,x2,x4,x6,x5,x3,x1)	f(x8,x7,x2,x4,x5,x6,x3,x1)	f(x8,x6,x2,x4,x5,x7,x3,x1)	f(x7,x6,x2,x4,x5,x8,x3,x1)
f(x5,x8,x6,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x8,x6,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x8,x2,x4,x6,x5,x3,x1)	f(x7,x8,x2,x4,x5,x6,x3,x1)	f(x6,x8,x2,x4,x5,x7,x3,x1)	f(x6,x7,x2,x4,x5,x8,x3,x1)
f(x6,x5,x8,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x5,x8,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x4,x2,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x8,x4,x2,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x8,x4,x2,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x7,x4,x2,x6,x5,x8,x3,x1)

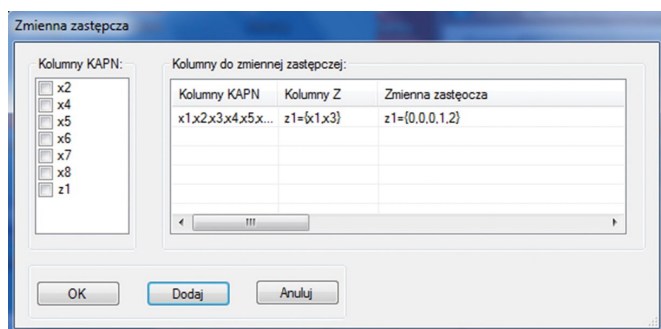
Układy optymalne z ... x3x1 (cd.)					
z ...x2x3x1	z ...x4x3x1	z ...x5x3x1	z ...x6x3x1	z ...x7x3x1	z ...x8x3x1
f(x5,x6,x8,x7,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x6,x8,x7,x2,x4,x3,x1)	f(x4,x8,x2,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x4,x8,x2,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x4,x8,x2,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x4,x7,x2,x6,x5,x8,x3,x1)
f(x7,x6,x5,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x6,x5,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x8,x2,x4,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x8,x2,x4,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x8,x2,x4,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x7,x2,x4,x6,x5,x8,x3,x1)
f(x6,x7,x5,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x7,x5,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x2,x8,x4,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x2,x8,x4,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x2,x8,x4,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x2,x7,x4,x6,x5,x8,x3,x1)
f(x7,x5,x6,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x7,x5,x6,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x4,x2,x8,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x8,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x8,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x7,x6,x5,x8,x3,x1)
f(x5,x7,x6,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x7,x6,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x2,x4,x8,x7,x6,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x8,x7,x5,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x8,x6,x5,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x7,x6,x5,x8,x3,x1)
f(x6,x5,x7,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x6,x5,x7,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x7,x4,x2,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x7,x4,x2,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x6,x4,x2,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x6,x4,x2,x7,x5,x8,x3,x1)
f(x5,x6,x7,x8,x4,x2,x3,x1)	f(x5,x6,x7,x8,x2,x4,x3,x1)	f(x4,x7,x2,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x4,x7,x2,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x4,x6,x2,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x4,x6,x2,x7,x5,x8,x3,x1)
		f(x7,x2,x4,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x7,x2,x4,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x6,x2,x4,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x6,x2,x4,x7,x5,x8,x3,x1)
		f(x2,x7,x4,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x2,x7,x4,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x2,x6,x4,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x2,x6,x4,x7,x5,x8,x3,x1)
		f(x4,x2,x7,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x7,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x6,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x6,x7,x5,x8,x3,x1)
		f(x2,x4,x7,x8,x6,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x7,x8,x5,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x6,x8,x5,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x6,x7,x5,x8,x3,x1)
		f(x8,x6,x4,x2,x7,x5,x3,x1)	f(x8,x5,x4,x2,x7,x6,x3,x1)	f(x8,x5,x4,x2,x6,x7,x3,x1)	f(x7,x5,x4,x2,x6,x8,x3,x1)
		f(x6,x8,x4,x2,x7,x5,x3,x1)	f(x5,x8,x4,x2,x7,x6,x3,x1)	f(x5,x8,x4,x2,x6,x7,x3,x1)	f(x5,x7,x4,x2,x6,x8,x3,x1)
		f(x8,x6,x2,x4,x7,x5,x3,x1)	f(x8,x5,x2,x4,x7,x6,x3,x1)	f(x8,x5,x2,x4,x6,x7,x3,x1)	f(x7,x5,x2,x4,x6,x8,x3,x1)
		f(x6,x8,x2,x4,x7,x5,x3,x1)	f(x5,x8,x2,x4,x7,x6,x3,x1)	f(x5,x8,x2,x4,x6,x7,x3,x1)	f(x5,x7,x2,x4,x6,x8,x3,x1)
		f(x8,x4,x2,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x8,x4,x2,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x8,x4,x2,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x7,x4,x2,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x4,x8,x2,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x4,x8,x2,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x4,x8,x2,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x4,x7,x2,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x8,x2,x4,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x8,x2,x4,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x8,x2,x4,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x7,x2,x4,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x2,x8,x4,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x2,x8,x4,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x2,x8,x4,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x2,x7,x4,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x4,x2,x8,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x8,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x8,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x7,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x2,x4,x8,x6,x7,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x8,x5,x7,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x8,x5,x6,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x7,x5,x6,x8,x3,x1)
		f(x6,x4,x2,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x5,x4,x2,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x5,x4,x2,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x5,x4,x2,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x4,x6,x2,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x6,x2,x4,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x5,x2,x4,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x5,x2,x4,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x5,x2,x4,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x2,x6,x4,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x4,x2,x6,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x2,x4,x6,x8,x7,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x8,x7,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x8,x6,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x7,x6,x8,x3,x1)
		f(x7,x6,x4,x2,x8,x5,x3,x1)	f(x7,x5,x4,x2,x8,x6,x3,x1)	f(x6,x5,x4,x2,x8,x7,x3,x1)	f(x6,x5,x4,x2,x7,x8,x3,x1)
		f(x6,x7,x4,x2,x8,x5,x3,x1)	f(x5,x7,x4,x2,x8,x6,x3,x1)	f(x5,x6,x4,x2,x8,x7,x3,x1)	f(x5,x6,x4,x2,x7,x8,x3,x1)
		f(x7,x4,x2,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x7,x4,x2,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x6,x4,x2,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x6,x4,x2,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x4,x7,x2,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x4,x7,x2,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x4,x6,x2,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x4,x6,x2,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x7,x2,x4,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x7,x2,x4,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x6,x2,x4,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x6,x2,x4,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x2,x7,x4,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x2,x7,x4,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x2,x6,x4,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x2,x6,x4,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x4,x2,x7,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x7,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x6,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x6,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x2,x4,x7,x6,x8,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x7,x5,x8,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x6,x5,x8,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x6,x5,x7,x8,x3,x1)
		f(x6,x4,x2,x7,x8,x5,x3,x1)	f(x5,x4,x2,x7,x8,x6,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x6,x8,x7,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x6,x7,x8,x3,x1)
		f(x4,x6,x2,x7,x8,x5,x3,x1)	f(x4,x5,x2,x7,x8,x6,x3,x1)	f(x5,x2,x4,x6,x8,x7,x3,x1)	f(x5,x2,x4,x6,x7,x8,x3,x1)
		f(x2,x6,x4,x7,x8,x5,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x7,x8,x6,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x6,x8,x7,x3,x1)	f(x2,x5,x4,x6,x7,x8,x3,x1)
		f(x4,x2,x6,x7,x8,x5,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x7,x8,x6,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x6,x8,x7,x3,x1)	f(x4,x2,x5,x6,x7,x8,x3,x1)
		f(x2,x4,x6,x7,x8,x5,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x7,x8,x6,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x6,x8,x7,x3,x1)	f(x2,x4,x5,x6,x7,x8,x3,x1)

Układy optymalne z ... x1x3					
z ...x2x1x3	z ...x4x1x3	z ...x5x1x3	z ...x6x1x3	z ...x7x1x3	z ...x8x1x3
f(x8,x7,x6,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x8,x7,x6,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x8,x7,x6,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x8,x7,x5,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x8,x6,x5,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x7,x6,x5,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x7,x8,x6,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x7,x8,x6,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x7,x8,x6,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x7,x8,x5,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x6,x8,x5,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x6,x7,x5,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x8,x6,x7,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x8,x6,x7,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x8,x6,x7,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x8,x5,x7,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x8,x5,x6,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x7,x5,x6,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x6,x8,x7,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x6,x8,x7,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x6,x8,x7,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x5,x8,x7,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x5,x8,x6,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x5,x7,x6,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x7,x6,x8,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x7,x6,x8,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x7,x6,x8,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x7,x5,x8,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x6,x5,x8,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x6,x5,x7,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x6,x7,x8,x5,x4,x2,x1,x3)	f(x6,x7,x8,x5,x2,x4,x1,x3)	f(x6,x7,x8,x4,x2,x5,x1,x3)	f(x5,x7,x8,x4,x2,x6,x1,x3)	f(x5,x6,x8,x4,x2,x7,x1,x3)	f(x5,x6,x7,x4,x2,x8,x1,x3)
f(x8,x7,x5,x6,x4,x2,x1,x3)	f(x8,x7,x5,x6,x2,x4,x1,x3)	f(x8,x7,x6,x2,x4,x5,x1,x3)	f(x8,x7,x5,x2,x4,x6,x1,x3)	f(x8,x6,x5,x2,x4,x7,x1,x3)	f(x7,x6,x5,x2,x4,x8,x1,x3)
f(x7,x8,x5,x6,x4,x2,x1,x3)	f(x7,x8,x5,x6,x2,x4,x1,x3)	f(x7,x8,x6,x2,x4,x5,x1,x3)	f(x7,x8,x5,x2,x4,x6,x1,x3)	f(x6,x8,x5,x2,x4,x7,x1,x3)	f(x6,x7,x5,x2,x4,x8,x1,x3)

innej zmiennej z pozostałych parametrów po x_6 pozwoliłoby uzyskać tę samą ilość gałęzi prawdziwych na obu rozrysowanych drzewach. Metoda sprawdzania nieredukowalnych gałęzi prawdziwych na wielowartościowych drzewach logicznych pozwala na znalezienie wśród korzystnych układów parametrów tych najlepszych, nawet jeśli różnice między nimi są minimalne, tak jak w analizowanym przykładzie. Dlatego też kolejną wartą rozważenia funkcjonalnością programu może być moduł liczący ilość gałęzi prawdziwych wielowartościowych, logicznych drzew decyzyjnych, na których ułożone są wybrane przez program optymalne układy. Moduł ten pomógłby zawęzić grono korzystnych układów parametrów do tych najlepszych.

4. Zastosowanie zmiennej zastępczej oraz nałożenie warunków na zmienne interakcyjne

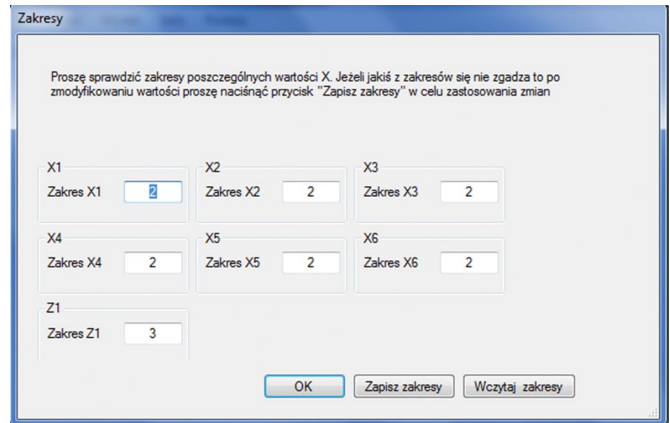
Po dokładniejszej analizie podetapów obliczeń pośrednich zauważono zależność między x_2 oraz x_4 . W każdym podetapie zredukowanym po x_2 wśród wszystkich parametrów parametr x_4 zawsze posiadał najmniejszą wartość (różną od pozostałych o 1), natomiast w podetapach zredukowanych po x_4 sytuacja się powtarzała. Tam minimum różniącym się od pozostałych parametrów o wartość 1 było zawsze x_2 . Założono zatem, że parametry x_2 i x_4 łączy jakaś zależność warunkowa. Założenie to było zaczątkiem pomysłu zastosowania na badanym przykładzie zarówno zmiennej zastępczej, jak i warunku. Zmienna zastępcza łączyłaby w sobie parametry najmniej ważne, czyli x_1 oraz x_3 , co zapewniłoby odpowiednie ułożenie parametrów o najniższej randze ważności, równocześnie nie zaciemniając układów pozostałych parametrów. Natomiast parametry x_2 oraz x_4 połączono by warunkiem, który nie pozwoliłby na ich rozdzielenie, mając na uwadze ich zależność względem siebie.



Rys. 4. Zakodowanie zmiennej zastępczej z_1 składającej się z parametrów x_1 oraz x_3

Zakodowanie zmiennej zastępczej Z_1 (taką bowiem nazwę otrzymał nowopowstały parametr), w skład której weszły x_1 oraz x_3 , zostało wykonane automatycznie przez program. Nowa zmienna stała się trójwartościowa, bowiem w zbiorze numerycznie zapisanych układów pojawiły się trzy różne układy występowania wspomnianych parametrów: 0..0.. (trzy razy), 1..0.., 0..1... Każdy z nich otrzymał kolejną wartość tj. 0, 1, 2, stąd wartościowość nowej zmiennej.

Zestawienie kolejnych wartości dla każdego układu wartości parametrów nowej zmiennej zostało przedstawione w tabeli 6, a samo pojawienie się z_1 zredukowało ilość parametrów do

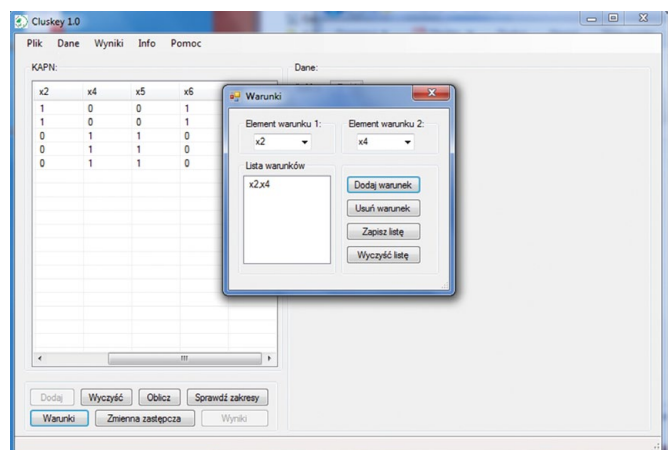


Rys. 5. Zakresy nowych zmiennych biorących udział w procesie obliczeniowym

Tabela 6. Ostateczny zapis kodowania zmiennych

Nowa numeracja	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
Stara numeracja	x2	x4	x5	x6	x7	x8	z(x1x3)
	1	0	1	0	0	1	0
	0	1	1	0	0	1	0
	1	1	0	1	1	0	0
	1	1	0	1	1	0	1
	1	1	0	1	1	0	2

siedmiu. Nowy zestaw parametrów został zapisany do pliku .txt, z którego można było pobrać go przy kolejnym etapie obliczeń. W następnym kroku na nowy zestaw parametrów nałożono warunek, który zapewnia łączne występowanie koło siebie parametrów x_2, x_4 (stare nazewnictwo), których zależność została wcześniej zauważona. Warunek zapewniał, że parametry nie zostaną rozdzielone i w każdym optymalnym rozwiązaniu będą ustawione koło siebie w kombinacji : x_2, x_4 .



Rys. 6. Utworzenie warunku występowania parametrów: x_2, x_4

Tabela 7. Tabela z korzystnym sposobem układu parametrów przy zastosowaniu warunku i zmiennej zastępczej

Układy optymalne				
f(x6,x5,x4,x3,x1,x2,x7)	f(x6,x5,x4,x1,x2,x3,x7)	f(x6,x5,x3,x1,x2,x4,x7)	f(x6,x4,x3,x1,x2,x5,x7)	f(x5,x4,x3,x1,x2,x6,x7)
f(x5,x6,x4,x3,x1,x2,x7)	f(x5,x6,x4,x1,x2,x3,x7)	f(x5,x6,x3,x1,x2,x4,x7)	f(x4,x6,x3,x1,x2,x5,x7)	f(x4,x5,x3,x1,x2,x6,x7)
f(x6,x4,x5,x3,x1,x2,x7)	f(x6,x4,x5,x1,x2,x3,x7)	f(x6,x3,x5,x1,x2,x4,x7)	f(x6,x3,x4,x1,x2,x5,x7)	f(x5,x3,x4,x1,x2,x6,x7)
f(x4,x6,x5,x3,x1,x2,x7)	f(x4,x6,x5,x1,x2,x3,x7)	f(x3,x6,x5,x1,x2,x4,x7)	f(x3,x6,x4,x1,x2,x5,x7)	f(x3,x5,x4,x1,x2,x6,x7)
f(x5,x4,x6,x3,x1,x2,x7)	f(x5,x4,x6,x1,x2,x3,x7)	f(x5,x3,x6,x1,x2,x4,x7)	f(x4,x3,x6,x1,x2,x5,x7)	f(x4,x3,x5,x1,x2,x6,x7)
f(x4,x5,x6,x3,x1,x2,x7)	f(x4,x5,x6,x1,x2,x3,x7)	f(x3,x5,x6,x1,x2,x4,x7)	f(x3,x4,x6,x1,x2,x5,x7)	f(x3,x4,x5,x1,x2,x6,x7)
f(x6,x5,x3,x4,x1,x2,x7)	f(x6,x5,x1,x2,x4,x3,x7)	f(x6,x5,x1,x2,x3,x4,x7)	f(x6,x4,x1,x2,x3,x5,x7)	f(x5,x4,x1,x2,x3,x6,x7)
f(x5,x6,x3,x4,x1,x2,x7)	f(x5,x6,x1,x2,x4,x3,x7)	f(x5,x6,x1,x2,x3,x4,x7)	f(x4,x6,x1,x2,x3,x5,x7)	f(x4,x5,x1,x2,x3,x6,x7)
f(x6,x3,x5,x4,x1,x2,x7)	f(x6,x1,x2,x5,x4,x3,x7)	f(x6,x1,x2,x5,x3,x4,x7)	f(x6,x1,x2,x4,x3,x5,x7)	f(x5,x1,x2,x4,x3,x6,x7)
f(x3,x6,x5,x4,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x6,x5,x4,x3,x7)	f(x1,x2,x6,x5,x3,x4,x7)	f(x1,x2,x6,x4,x3,x5,x7)	f(x1,x2,x5,x4,x3,x6,x7)
f(x5,x3,x6,x4,x1,x2,x7)	f(x5,x1,x2,x6,x4,x3,x7)	f(x5,x1,x2,x6,x3,x4,x7)	f(x4,x1,x2,x6,x3,x5,x7)	f(x4,x1,x2,x5,x3,x6,x7)
f(x3,x5,x6,x4,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x5,x6,x4,x3,x7)	f(x1,x2,x5,x6,x3,x4,x7)	f(x1,x2,x4,x6,x3,x5,x7)	f(x1,x2,x4,x5,x3,x6,x7)
f(x6,x4,x3,x5,x1,x2,x7)	f(x6,x4,x1,x2,x5,x3,x7)	f(x6,x3,x1,x2,x5,x4,x7)	f(x6,x3,x1,x2,x4,x5,x7)	f(x5,x3,x1,x2,x4,x6,x7)
f(x4,x6,x3,x5,x1,x2,x7)	f(x4,x6,x1,x2,x5,x3,x7)	f(x3,x6,x1,x2,x5,x4,x7)	f(x3,x6,x1,x2,x4,x5,x7)	f(x3,x5,x1,x2,x4,x6,x7)
f(x6,x3,x4,x5,x1,x2,x7)	f(x6,x1,x2,x4,x5,x3,x7)	f(x6,x1,x2,x3,x5,x4,x7)	f(x6,x1,x2,x3,x4,x5,x7)	f(x5,x1,x2,x3,x4,x6,x7)
f(x3,x6,x4,x5,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x6,x4,x5,x3,x7)	f(x1,x2,x6,x3,x5,x4,x7)	f(x1,x2,x6,x3,x4,x5,x7)	f(x1,x2,x5,x3,x4,x6,x7)
f(x4,x3,x6,x5,x1,x2,x7)	f(x4,x1,x2,x6,x5,x3,x7)	f(x3,x1,x2,x6,x5,x4,x7)	f(x3,x1,x2,x6,x4,x5,x7)	f(x3,x1,x2,x5,x4,x6,x7)
f(x3,x4,x6,x5,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x4,x6,x5,x3,x7)	f(x1,x2,x3,x6,x5,x4,x7)	f(x1,x2,x3,x6,x4,x5,x7)	f(x1,x2,x3,x5,x4,x6,x7)
f(x5,x4,x3,x6,x1,x2,x7)	f(x5,x4,x1,x2,x6,x3,x7)	f(x5,x3,x1,x2,x6,x4,x7)	f(x4,x3,x1,x2,x6,x5,x7)	f(x4,x3,x1,x2,x5,x6,x7)
f(x4,x5,x3,x6,x1,x2,x7)	f(x4,x5,x1,x2,x6,x3,x7)	f(x3,x5,x1,x2,x6,x4,x7)	f(x3,x4,x1,x2,x6,x5,x7)	f(x3,x4,x1,x2,x5,x6,x7)
f(x5,x3,x4,x6,x1,x2,x7)	f(x5,x1,x2,x4,x6,x3,x7)	f(x5,x1,x2,x3,x6,x4,x7)	f(x4,x1,x2,x3,x6,x5,x7)	f(x4,x1,x2,x3,x5,x6,x7)
f(x3,x5,x4,x6,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x5,x4,x6,x3,x7)	f(x1,x2,x5,x3,x6,x4,x7)	f(x1,x2,x4,x3,x6,x5,x7)	f(x1,x2,x4,x3,x5,x6,x7)
f(x4,x3,x5,x6,x1,x2,x7)	f(x4,x1,x2,x5,x6,x3,x7)	f(x3,x1,x2,x5,x6,x4,x7)	f(x3,x1,x2,x4,x6,x5,x7)	f(x3,x1,x2,x4,x5,x6,x7)
f(x3,x4,x5,x6,x1,x2,x7)	f(x1,x2,x4,x5,x6,x3,x7)	f(x1,x2,x3,x5,x6,x4,x7)	f(x1,x2,x3,x4,x6,x5,x7)	f(x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7)

Dzięki zastosowaniu obu zabiegów dokonano redukcji czasu procesu obliczeniowego, a także ilości układów optymalnych do 120. Tak zredukowana liczba układów optymalnych pozwala w prostszy sposób dokonać dalszej analizy, skupiając się jedynie na pozostałych zmiennych (x_5, x_6, x_7, x_8).

Jak można zauważyć w tabeli 7, pozostałe parametry posiadają tę samą rangę ważności, gdyż w każdym etapie (redukowanym po danym x) pozostałe zmienne układają się w układach optymalnych na kolejnej pozycji za zredukowaną zmienną, czyli można założyć, że przyjmują tę samą wartość w obliczeniach podetapowych. Taka wiedza z kolei pozwala założyć, że pozostałe parametry posiadają względem siebie tę samą rangę ważności. Można zatem zaryzykować stwierdzenie, że są one równoważne i niezależne.

Wnioski

Przedstawiony w powyższych rozdziałach przykład zastosowania programu komputerowego (wraz z jego dodatkowymi funkcjonalnościami) w procesie wyznaczania rangi ważności pokazuje, jak przydatnym narzędziem jest program. Złożony i czasochłonny proces, pierwotnie pochłaniający czas i uwagę użytkownika, trwa obecnie od kilku do kilkudziesięciu sekund, nie absorbuje uwagi użytkownika i eliminuje

wiele potencjalnych ludzkich błędów. Dzięki pomysłowi zapisu otrzymanych wyników i wyliczeń pośrednich do pliku rezultaty pracy programu można w prosty sposób wykorzystać w dalszych badaniach i analizach.

Jak zostało już wspomniane, współczesne urządzenia posiadają interakcyjne parametry, o których nie wolno zapominać, gdyż powodują one znaczny wpływ danych zmiennych na siebie, a co za tym idzie – na jakość pracy maszyny. Dlatego też dodatkowe funkcjonalności programu (możliwość narzucenia warunkowości układu parametrów oraz utworzenie zmiennych zastępczych) są bardzo wartościowymi elementami przedstawionego programu. Nie tylko ograniczają czas obliczeniowy, dbają o nierozzerwalność zależnych parametrów, ale także ograniczają ilość układów optymalnych, usuwając te, które rozdzielają zmienne interakcyjne.


Opisany przykład pokazuje, że program może być wykorzystywany także w innych dziedzinach życia, w których potrzebna jest solidna wiedza na temat ważności poszczególnych cech, danych, parametrów, opisów lub zmiennych. Wystarczy, że istnieje możliwość odpowiedniego zakodowania danych zebranych w czasie badań czy pomiarów. Jak zostało przedstawione, algorytm sprawdza się nawet w przypadku niewielkiej różnicy wagi poszczególnych rang ważności.

Algorytm logiczny wielowartościowy, będący podstawą opisanego programu komputerowego, stanowi pomocne narzędzie w podejmowaniu decyzji w sytuacjach ustalania wagi pobranych i modyfikowanych danych dotyczących ważnego w danym momencie zagadnienia. Dlatego też wykazana przydatność samego programu, jak i jego dodatkowych funkcji w procesie wyznaczania rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych zachęca do dalszych prac nad modernizacją, testowaniem, usprawnianiem, a także rozbudową programu, tak aby stał się on jeszcze bardziej wartościowy dla wspomnianego procesu.

Jak zostało wspomniane w punkcie trzecim, ciekawą funkcjonalnością programu może być moduł liczący ilość gałęzi prawdziwych wielowartościowych logicznych drzew decyzyjnych przedstawiających wybrane przez program optymalne układy. Warto pomyśleć nad tym rozwiązaniem, by ograniczyć (szczególnie w obszernych przykładach) ogromną liczbę układów optymalnych do zbioru kilku tych najkorzystniejszych. Kolejnym pomysłem udoskonalenia programu jest możliwość wprowadzenia do procesu obliczeniowego zestawu parametrów z jedną lub kilkoma zmiennymi jednowartościowymi. Bardzo często można bowiem spotkać przypadki zestawów parametrów z jednym przyjmującym tylko wartość 0. Taka zmienna nie powinna podlegać standardowemu procesowi redukcyjnemu. Jej ranga ważności zawsze powinna być wyliczana w specjalny sposób, taki, który nie zakłama dalszych obliczeń. Dalsza praca nad programem pozwoli na wprowadzenie do procesu obliczeniowego także tych specyficznych przypadków i wyliczenie także dla nich układów optymalnych.

Literatura

- [1] PARTYKA M.A., TISZBIEREK A.: *Zastosowanie logicznych algorytmów minimalizacyjnych do komputerowego wspomaganie wyznaczania rangi ważności parametrów w układach automatyki i sterowania*. „Napędy i Sterowanie” 9/2015.
- [2] TISZBIEREK A.: *Wyznaczanie rangi ważności parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych z uwzględnieniem interakcji i warunkowości na przykładzie CAD układów automatyki i sterowania*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Elektryka” z. 74, nr 362/2016, Opole 2016.
- [3] PAWŁAK Z.: *Systemy informacyjne*. WNT, Warszawa 1983.
- [4] PARTYKA M.A.: *Podobieństwa i różnice przybliżonej klasyfikacji obiektów w ujęciu logiki i systemów informacyjnych dla CAD procesów decyzyjnych*. XXIV Konferencja Zastosowań Matematyki, Instytut Matematyki PAN, Zakopane 1995.
- [5] TISZBIEREK A., PARTYKA M.A.: *Zastosowanie komputerowego wspomaganie procesu wyznaczania optymalnych logicznych wielowartościowych drzew decyzyjnych na rzeczywistym przykładzie zmiennych warunkowych o podobnej ważności*. XLV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Zastosowań Matematyki PAN, Zakopane-Kościelisko 2016, Instytut Matematyki PAN, Warszawa 2016.

 dr inż. Agnieszka Tiszbierek jest adiunktem na Wydziale Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej;
e-mail: a.tiszbierek@po.opole.pl

artykuł recenzowany

reklama

Darmowa e-prenumerata!

www.nis.com.pl





napędy i sterowanie miesięcznik naukowo-techniczny

Elektrowibratory z silnikami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi przeznaczone do przemysłowych napędów elektrowibracyjnych

Robert Rossa

1. Wstęp

W latach 2015–2018 w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz w firmie DEMETRIX Sp. z o.o., Sp. k. realizowano prace badawcze nad nowym typem wysokosprawnych napędów elektrycznych dla przemysłowych maszyn elektrowibracyjnych. Prace te były dofinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach trzeciej edycji Programu Badań Stosowanych. W wyniku realizacji projektu PBS opracowano modelowy, dwusilnikowy napęd elektrowibracyjny, generujący liniowe drgania mechaniczne, charakteryzujący się szeregiem zalet w stosunku do rozwiązań dostępnych na rynku [1].

W przemysłowych urządzeniach elektrowibracyjnych (przesiewacze, wstrząsarki itp.) często wymagane jest wymuszenie drgań mechanicznych liniowych, sinusoidalnie zmiennych. W dotychczasowych rozwiązaniach napędów elektrowibracyjnych drgania takie są wytwarzane przez dwusilnikowe układy napędowe, w których dwa identyczne elektrowibratory z silnikami indukcyjnymi klatkowymi pracują przeciwbieżnie, tzn. z tą samą prędkością obrotową wirników, lecz z przeciwnymi kierunkami wirowania.

Istotną wadą dotychczasowych rozwiązań dwusilnikowych napędów maszyn elektrowibracyjnych jest to, że praca przeciwbieżna silników indukcyjnych jest osiągana dzięki tzw. zjawisku samosynchronizacji [2], polegającemu na stopniowym, samoczynnym synchronizowaniu się prędkości obrotowych silników w trakcie rozruchu napędu. Samosynchronizacja występuje jedynie przy wyższych prędkościach obrotowych silników i może nie zostać osiągnięta w wyniku nawet drobnych wad konstrukcyjnych, montażowych lub materiałowych maszyny elektrowibracyjnej. Od początku rozruchu aż do momentu zsynchronizowania się prędkości obrotowych silników zjawisku samosynchronizacji towarzyszą niepożądane drgania maszyny elektrowibracyjnej, o maksymalnej amplitudzie znacznie większej od amplitudy drgań roboczych maszyny, przy czym zarówno amplituda, jak i kierunek tych drgań nie są kontrolowane. Podobne niepożądane zjawiska towarzyszą wyłączeniu dwusilnikowego napędu wibracyjnego z sieci zasilającej.

Kolejną istotną wadą obecnych rozwiązań napędów dwusilnikowych jest brak możliwości regulacji wzajemnego przesunięcia kąтового między osiami wirujących mas niewyważonych, napędzanych jednym i drugim silnikiem indukcyjnym, a w efekcie brak możliwości zmiany kierunku drgań liniowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono konstrukcję obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora wyposażonego w silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi (PMSM). Elektrowibrator ten jest przeznaczony do zastosowania w przemysłowych napędach elektrowibracyjnych, zwłaszcza w napędach dwusilnikowych generujących drgania mechaniczne liniowe, sinusoidalnie zmiennie. Wybrane parametry elektromechaniczne elektrowibratora z silnikiem PMSM porównano z parametrami odpowiedniego elektrowibratora tradycyjnego, wyposażonego w silnik indukcyjny klatkowy. Przedstawiono zalety wynikające z zastosowania elektrowibratorów z silnikami PMSM na tle dotychczasowych rozwiązań z silnikami indukcyjnymi.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, elektrowibrator, napęd elektrowibracyjny

ELECTRIC VIBRATORS WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS DEDICATED TO INDUSTRIAL ELECTRO-VIBRATING DRIVES

Abstract: In the paper a construction of electromagnetic circuit of electrovibrator equipped with permanent magnet synchronous motor (PMSM) is described. This electrovibrator is intended for use in the industrial vibrating motor drives, especially in dual-motor drives generating linear, sinusoidal mechanical vibrations. Selected electromechanical parameters of the electrovibrator with the PMSM motor are compared with the parameters of a similar traditional electrovibrator, equipped with a squirrel-cage induction motor. The advantages resulting from the use of electrovibrators with PMSM motors on the background of existing solutions with induction motors are presented.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, electrovibrator, vibrating motor drive

generowanych przez napęd. Ponadto silniki indukcyjne klatkowe nie są energooszczędne i mają stosunkowo dużą masę w odniesieniu do generowanego momentu obrotowego lub do generowanej siły wymuszającej drgania w napędzie elektrowibracyjnym.

W artykule opisano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego jednego z modelowych elektrowibratorów z silnikiem

PMSM opracowaną w ramach projektu PBS, następnie porównano wybrane parametry elektromechaniczne modelowego elektrowibratora PMSM z parametrami typowego elektrowibratora z silnikiem indukcyjnym klatkowym, o zbliżonej wydajności i prędkości obrotowej.

2. Obwód elektromagnetyczny elektrowibratora PMSM

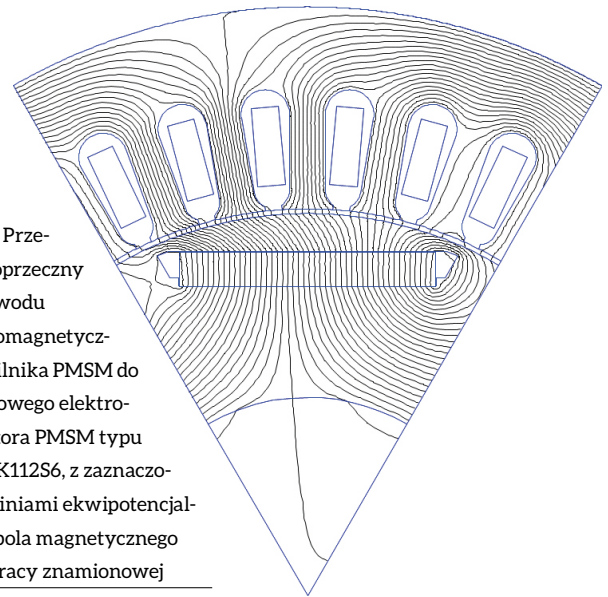
Opisywany modelowy silnik elektrowibratora PMSM zaprojektowano o wzniosie mechanicznym 112 mm. Maszynie nadano oznaczenie typu SMwsK112S6. Jest to silnik trójfazowy, z układem elektroizolacyjnym dostosowanym do zasilania z energoelektronicznych przemienników częstotliwości i o klasie temperaturowej H. Silnik ten nie jest wyposażony w klatkę rozruchową w wirniku i dla poprawnej jego pracy niezbędne jest zasilanie z odpowiednio zaprogramowanego przemiennika częstotliwości, który także został opracowany i wykonany w ramach projektu PBS (przemiennik dostarczyła firma Enel-PC Sp. z o.o.).

Modelowy silnik PMSM zaprojektowano jako maszynę o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 6$. Uzwojenie twornika zaprojektowano jako klasyczne uzwojenie trójfazowe z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie. Jest to uzwojenie jednowarstwowe, o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 2$. W tworniku zastosowano skos żłobków uzwojenia o jedną pełną podziałkę żłobkową, w celu ograniczenia niepożądanego zjawiska tzw. momentu zaczepowego [3–8].

W wirniku modelowego silnika PMSM rozmieszczono sześć biegunów magnetycznych na bazie magnesów trwałych NdFeB typu N42UH, wytrzymujących długotrwałe pracę w temperaturze do 180°C. Magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich NdFeB doskonale nadają się do zastosowania w aplikacjach, gdzie są one narażone na drgania mechaniczne o znacznej amplitudzie i częstotliwości, gdyż poza sytuacjami skutkującymi mechanicznym uszkodzeniem magnesu (np. pęknięcie wskutek naprężeń mechanicznych) drgania mechaniczne mają znikomy wpływ na stabilność właściwości magnetycznych tych magnesów [9].

Fragment przekroju poprzecznego obwodu magnetycznego silnika SMwsK112S6 pokazano na rysunku 1. Na rysunku 2 pokazano zamocowany w korpusie uzwojony twornik, z widocznym skosem żłobków, a na rysunku 3 wirnik silnika wraz z wałem napędowym i jedną z tarcz łożyskowych. Podstawowe dane konstrukcyjne obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM zestawiono poniżej:

- liczba biegunów magnetycznych $2p = 6$;
- średnica zewnętrzna pakietowanego rdzenia stojana (twornika) $D_1 = 175$ mm;
- średnica wewnętrzna stojana $D = 115$ mm;
- długość rdzenia $L_{Fe} = 70$ mm;
- liczba żłobków stojana $Q_s = 36$;
- skos żłobków 10 mm na $\varnothing 115$ mm;
- szczelina powietrzna $\delta = 0,7$ mm;
- średnica wału pod pakietem wirnika $D_w = 60$ mm;
- magnesy N42UH, dwa magnesy na długości rdzenia;
- uzwojenie twornika o masie miedzi 2,35 kg.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny 1/6 obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM do modelowego elektrowibratora PMSM typu SMwsK112S6, z zaznaczonymi liniami ekwipotencjalnymi pola magnetycznego przy pracy znamionowej

Konstrukcję mechaniczną modelowego elektrowibratora z silnikiem PMSM oparto o wykorzystanie tarcz łożyskowych i mas niewyważonych z komercyjnie oferowanych na rynku elektrowibratorów z trójfazowymi silnikami indukcyjnymi. W ramach projektu PBS zaprojektowano i wykonano natomiast spawany korpus stalowy elektrowibratora PMSM, pokazany na rysunkach 2 i 4.

Modelowy elektrowibrator PMSM wykorzystuje enkoder inkrementalny do precyzyjnego, ciągłego odczytu informacji o aktualnym położeniu osi magnesów trwałych względem osi faz uzwojenia twornika. Enkoder ten zamontowano na osłonie jednej z dwóch mas niewyważonych elektrowibratora, jak pokazano na rysunku 5.

3. Porównanie wybranych parametrów modelowego elektrowibratora PMSM i odpowiednika indukcyjnego

Modelowy elektrowibrator SMwsK112S6 jest maszyną sześciobiegunową, jednak dzięki zasilaniu z dedykowanego przemiennika częstotliwości może on pracować w szerokim zakresie prędkości obrotowych, z prędkością maksymalną ok. 1800 obr./min. Przyjmując, że prędkość znamionowa modelowego elektrowibratora to 1500 obr./min, jego osiągnięte parametry elektromechaniczne postanowiono zestawić z parametrami odpowiedniego trójfazowego elektrowibratora indukcyjnego. Obliczeniowa moc znamionowa elektrowibratora PMSM to 2 kW (na wale). Do porównania dobrano dostępny na rynku elektrowibrator indukcyjny 4-biegunowy renomowanego producenta, o tym samym wzniosie mechanicznym osi wału, z zamontowanymi takimi samymi masami niewyważonymi, o mocy znamionowej wejściowej 2,5 kW. Podstawowe dane konstrukcyjne elektrowibratora indukcyjnego są następujące:

- liczba biegunów magnetycznych $2p = 4$;
- średnica zewnętrzna pakietowanego rdzenia stojana (twornika) $D_1 = 175$ mm;
- średnica wewnętrzna stojana $D = 110$ mm;
- długość rdzenia $L_{Fe} = 110$ mm;
- liczba żłobków stojana $Q_s = 36$;



Rys. 2. Uzwojony twornik silnika SMwsK112S6 osadzony w korpusie stalowym spawanym

- skos żłobków stojana – brak;
- szczelina powietrzna $\delta = 0,5$ mm;
- liczba żłobków wirnika $Q_r = 32$;
- skos żłobków wirnika – o jedną podziałkę żłobkową;
- średnica wału pod pakietem wirnika $D_w = 60$ mm;
- uzwojenie twornika o masie miedzi 2,9 kg.

Producenci elektrowibratorów z silnikami indukcyjnymi nie podają ich mocy znamionowej na wałe oraz sprawności, więc przeprowadzono badania laboratoryjne elektrowibratora indukcyjnego, które zestawiono z wynikami badań modelowego elektrowibratora PMSM. W trakcie badań elektrowibrator indukcyjny był zasilany z zespołu maszynowego lub bezpośrednio z sieci, a elektrowibrator PMSM z dedykowanego przemiennika częstotliwości. Wybrane wyniki badań laboratoryjnych obu elektrowibratorów zestawiono w tabeli 1.

Z porównania parametrów klasycznych elektrowibratorów indukcyjnych trójfazowych renomowanego producenta oraz odpowiadających im wydajnością modelowych elektrowibratorów PMSM z silnikiem SMwsK112S6 można wnioskować, że:

- długość czynną obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora zmniejszono w nowym rozwiązaniu o 36%, ze 110 mm do 70 mm;



Rys. 3. Wirnik i wał silnika SMwsK112S6



Rys. 5. Sposób zamocowania enkodera inkrementalnego dla modelowego silnika SMwsK112S6



Rys. 4. Modelowe silniki PMSM – SMwsK112S6

Tabela 1. Zestawienie wybranych wyników z próby nagrzewania elektrowibratorów z silnikiem indukcyjnym i PMSM

	Silnik indukcyjny	Silnik PMSM
Moc na wałe, P_2 [W]	2041	2144
Moc wejściowa, P_1 [W]	2501	2401
Sprawność, η [%]	81.6	89.3
Moment na wałe, T [N·m]	13.49	13.64
Prąd zasilania, I_1 [Arms]	4.55	4.88
Napięcie zasil., U [Vrms]	400	380
Prędkość obr., n [1/min]	1445	1500
Przyrost temp. uzw. [K]	80	53
Masa elektrowibratora bez przeciwwag [kg]	89	73.5

- pomimo zmniejszenia długości obwodu elektromagnetycznego uzyskano sprawność elektrowibratora PMSM o 7,7 punktu procentowego wyższą od sprawności odpowiedniego elektrowibratora indukcyjnego (dla mocy na wale 2 kW osiągnięto w elektrowibratorze bazującym na PMSM sprawność 89,3%, wobec sprawności 81,6% dla elektrowibratora indukcyjnego);
- po uwzględnieniu sprawności przemiennika częstotliwości ok. 98%, sprawność modelowego napędu z elektrowibratorami PMSM wynosi ok. 87,5% i nadal jest o ok. 6 punktów procentowych wyższa od sprawności rozwiązania klasycznego, indukcyjnego;
- zmniejszenie długości rdzenia magnetycznego elektrowibratora o 36% przekłada się, przy zastosowaniu podobnej konstrukcji i materiałów w kadłubie i tarczach łożyskowych, na redukcję masy elektrowibratora PMSM w stosunku do elektrowibratora indukcyjnego o ok. 17,5%, z 89 kg (bez zamontowanych mas niewyważonych) na ok. 73,5 kg.

Biorąc pod uwagę powyższe dane, można stwierdzić, że istotnymi zaletami wynikającymi z zastosowania w urządzeniach elektrowibracyjnych nowych napędów elektrowibracyjnych z silnikami PMSM, w stosunku do napędów klasycznych indukcyjnych, są:

- możliwość zmniejszenia gabarytu i masy napędzanych przemysłowych urządzeń elektrowibracyjnych;
- znaczące zmniejszenie energochłonności urządzeń elektrowibracyjnych, zwłaszcza pracujących w ruchu ciągłym.

Innymi zaletami, wynikającymi z wyeliminowania zjawiska samosynchronizacji w napędach elektrowibracyjnych dwusilnikowych, poprzez zapewnienie w pełni przeciwbieżnej pracy napędu od startu do zatrzymania, są:

- zdecydowanie poprawiona kultura pracy napędu elektrowibracyjnego, poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie niepożądanych, niekontrolowanych drgań i hałasu urządzeń wibracyjnych w trakcie ich rozruchu oraz zatrzymania;
- poprawione bezpieczeństwo użytkowania i obsługi urządzeń wibracyjnych;
- zwiększona trwałość napędzanych urządzeń wibracyjnych;
- nowa funkcjonalność napędów elektrowibracyjnych z silnikami PMSM:
 - możliwość zmiany kierunku generowanych drgań liniowych;
 - możliwość regulacji prędkości obrotowej napędu wibracyjnego w szerokim zakresie (zmiana częstotliwości drgań i tym samym parametrów przesiewania, szybkości transportu materiału);
 - możliwość zadawania cyklu pracy napędu wibracyjnego, z uwzględnieniem zmian prędkości napędu i kierunku generowanych drgań, możliwość zaprogramowania i wywoływania z pamięci sterownika różnych wcześniej zaprogramowanych cykli pracy napędu,
- możliwość zastosowania nowych funkcjonalności napędu wibracyjnego (wymienionych wyżej) dla materiałów trudnoodsiewalnych, gdzie klasyczne napędy wibracyjne są mało efektywne (zwiększenie wydajności przesiewania dla pewnej grupy materiałów).

4. Podsumowanie


Opisane w artykule rozwiązanie modelowego elektrowibratora, z silnikiem PMSM zamiast silnika indukcyjnego, jest przeznaczone głównie do napędów elektrowibracyjnych dwusilnikowych, gdzie dwa identyczne elektrowibratory PMSM są zasilane z dedykowanego przemiennika częstotliwości i pracują przeciwbieżnie od startu aż do zatrzymania, z możliwością zmiany cyklu pracy napędu wibracyjnego (zmiana prędkości lub kierunku generowanych mechanicznych drgań liniowych).

W oparciu o zaproponowane rozwiązanie napędu elektrowibracyjnego, bazujące na dwóch silnikach PMSM, Instytut KOMEL wspólnie z firmą DEMETRIX są w stanie opracować i wykonać przemysłowe urządzenia elektrowibracyjne dostosowane do specyficznych wymagań klienta, charakteryzujące się lżejszą konstrukcją i zmniejszonymi wymiarami gabarytowymi oraz znacznie wyższą sprawnością napędu elektrowibracyjnego w stosunku do rozwiązań dostępnych obecnie na rynku.

Literatura

- [1] Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych. „Napędy i Sterowanie” 12/2018.
- [2] ENGEL Z.: *Badania synchronizacji i samosynchronizacji wibratorów mechanicznych*. „Mechanika teoretyczna i stosowana”, tom 5, zeszyt 4, PWN, Warszawa 1967.
- [3] BIANCHINI C., IMMOVILLI F., LORENZANI E., BELLINI A., DAVOLI M.: *Review of Design Solutions for Internal Permanent-Magnet Machines Cogging Torque Reduction*, in IEEE Trans. on Magn., vol. 48, no. 10, Oct. 2012.
- [4] ZHU L., JIANG S., ZHU Z., AND CHAN C.: *Analytical methods for minimizing cogging torque in permanent-magnet machines*, IEEE Trans. on Magn., vol. 45, no. 4, Apr. 2009.
- [5] DOSIEK L., PILLAY P.: *Cogging torque reduction in permanent magnet machines*, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 43, no. 6, Nov.–Dec. 2007.
- [6] ZHU Z., RUANGSINCHAIWANICH S., SCHOFIELD N., HOWE D.: *Reduction of cogging torque in interior-magnet brushless machines*, IEEE Trans. on Magn., vol. 39, no. 5, Sep. 2003.
- [7] KANG G.-H., HUR J.: *Analytical prediction and reduction of the cogging torque in interior permanent magnet motor*, in Proc. IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives, May 2005.
- [8] NADOLSKI R., GAWĘCKI Z.: *Analiza możliwości zmniejszenia momentu zaczepowego w silniku bezszczotkowym prądu stałego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 4 (108)/2015.
- [9] *Magnet Guide & Tutorial*, https://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Tutorial_v85_1.pdf.

Projekt „Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych”, współfinansowany ze środków NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych, zgodnie z umową: PBS3/B4/15/2015.

 dr inż. Robert Rossa

e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

Utrzymanie ruchu w przemyśle. Wstęp

Sławomir Szymaniec, Marek Kacperak

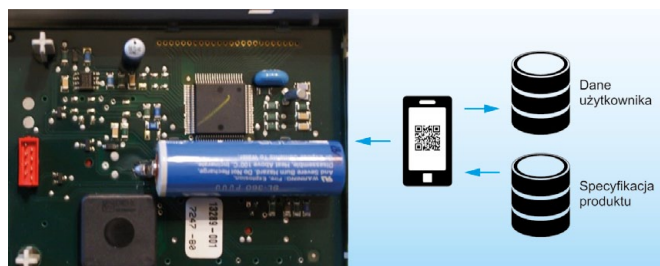
Obserwując życie gospodarcze w kraju, autorzy monografii nie dostrzegają wyraźnych znamion merytorycznego przygotowania przemysłu, energetyki ani usług do zaistnienia czwartej rewolucji przemysłowej.

Współczesne uwarunkowania rynkowe stawiają wysokie wymagania przed wszystkimi firmami uczestniczącymi w konkurencyjnej rywalizacji o odbiorcę produktów lub usług. Wskutek intensywnego rozwoju techniki, zwłaszcza w ostatnich latach, budowane są coraz to bardziej skomplikowane maszyny i urządzenia. W przodujących gospodarczo i technicznie krajach maleją zasoby siły roboczej, efektywność wytwarzania jest coraz większa, na każdym kroku wprowadza się optymalizację kosztów produkcji przy zapewnieniu satysfakcjonującej jakości produktu i usług, spełniającej wymagania w zakresie ochrony środowiska. Wymienione wyżej zjawiska i procesy to główne cechy społeczne, ekonomiczne i gospodarcze obecnej rzeczywistości w skali globalnej w krajach rozwiniętych technicznie i gospodarczo.

Pierwsza rewolucja przemysłowa wprowadziła mechanizację do produkcji, druga w życie gospodarcze i codzienność wprowadziła elektryczność. W latach 70. XX wieku miała miejsce trzecia rewolucja, która rozwinęła procesy produkcyjne i przyniosła technologie informatyczne [79, 88, 144, 161, 162]. Historycznie rzecz ujmując, pierwsze trzy rewolucje zostały rozpoznane, opisane i wstępnie zanalizowane już po fakcie ich nastania. Obecnie, zupełnie inaczej niż poprzednio, termin Industrie 4.0 (Przemysł 4.0) opisuje rewolucję jeszcze przed jej nastaniem, inspirując przy tym jej wprowadzenie.

Czynnikami umożliwiającymi powyższe zmiany są nowości techniczne, wśród których pierwszoplanową rolę odgrywa technika cyfrowa i informatyka. Dzięki rozwojowi techniki rzeczywistością staje się funkcjonowanie systemów cyberfizycznych, w których proces wytwarzania jest prowadzony jednocześnie w dwóch warstwach: fizycznej i wirtualnej. Wprowadzeniu zmian sprzyja, a wręcz je wymusza, zaawansowana automatyzacja i robotyzacja środków produkcji oraz nowy poziom komunikacji wzajemnej i komunikacji człowiek – maszyna [79, 88, 144, 161, 162].

Czwarta rewolucja przemysłowa ma zaspokoić indywidualne wymagania i aspiracje klientów, a także umożliwić rozwiązanie podstawowych oczekiwań i żądań ogółu konsumentów i nabywców, polegających na uzyskaniu większej produktywności i wydajności „na każdym etapie” działalności człowieka. Ma ona również wspierać współpracę między ludźmi i maszynami. Czwarta rewolucja przemysłowa w ramach obszarów: nauka, technologia i społeczeństwo spowoduje, że znajdą się one w cyklicznej relacji między sobą i będą wzajemnie na siebie korzystnie i twórczo wpływać. W przyszłości przewiduje się, że technologie automatyzujące część naszego ludzkiego intelektu



Rys. 1. Przykładowy sterownik w procesie grzania i jego otoczenie



Rys. 2. Przykładowy zespół maszynowy – wentylator powietrza i jego otoczenie



Rys. 3. Przykładowy zespół maszynowy – turbogenerator i jego otoczenie

staną się podstawą przyszłego rozwoju. W tym społeczeństwie przyszłości ludzie i maszyny będą działali w harmonii, wykorzystując na co dzień sztuczną inteligencję [79, 88, 144, 161, 162]. Ta rewolucja niesie ze sobą potencjał ogromnych zmian. Przewiduje się, że nastąpi geometryczny wzrost przetwarzania danych. Jednocześnie ogrom przyszłych potrzeb można sobie wyobrazić, spoglądając na wykładniczy wzrost liczby połączonych ze sobą rzeczy w codziennym bytowaniu człowieka [79, 88, 144, 161, 162].

Przemysł 4.0 jest często traktowany jako pojęcie teoretyczne, abstrakcyjne, stąd też korzystnie jest przedstawić w rozważaniach jego podstawy na przykładach praktycznych, znanych autorom monografii – rys. 1–3. Weźmy jako przykład trzy

obiekty przemysłowe: sterownik, wentylator powietrza i turbogenerator, które udostępniają swoją reprezentację wirtualną w systemie IT (z ang. *Information Technology* – technologia informatyczna).

Sterownik z rys. 1 to prosty sterownik wykorzystywany w procesie grzania, wyprodukowany w trakcie w pełni monitorowanego procesu produkcyjnego. Jeśli powiążemy go z numerem seryjnym i utworzymy dla niego kod QR¹, będziemy mogli go zidentyfikować cyfrowo. Zeskanowanie kodu umożliwi uzyskanie informacji o miejscu, czasie i sposobie produkcji sterownika oraz o drodze, jaką przebył on do urządzenia końcowego. Sterownik będzie można wykorzystać np. w całkowicie cyfrowej linii produkcyjnej, ewentualnie w innej rzeczywistości technicznej, gdzie jego kod będzie skanowany po zainstalowaniu w istniejącej strukturze elektroniczno-informatycznej. Informacje o jego czasie pracy, parametrach, producencie i dostawcy będą dostępne w systemie. Istniejący system diagnostyczny i kontrolny będzie mógł rejestrować jego działanie i oceniać stan techniczny, tak aby przewidzieć pozostały czas eksploatacji sterownika (*predictive maintenance*) i zapewnić bezpieczeństwo oraz ciągłość funkcjonowania procesu technologicznego, w którym bierze udział. Kiedy prognoza wskaże zwiększone ryzyko awarii, system będzie mógł automatycznie zamówić urządzenie zastępcze. Nowy sterownik będzie można zainstalować w trakcie najbliższej konserwacji urządzenia grzewczego, unikając zbędnego przestoju i strat w produkcji w przypadku awarii.

Przykładowy sterownik, zespół maszynowy – wentylator powietrza czy turbogenerator w połączeniu z jego cyfrową, wirtualną reprezentacją – można uznać za system cyberfizyczny² (ang. *cyberphysical system*, CPS), stanowiący jeden z podstawowych elementów koncepcji Przemysłu 4.0. Jest to wirtualna reprezentacja urządzenia fizycznego. Takie elementy można umieszczać w bardziej złożonych strukturach – np. w linii produkcyjnej, systemie zasilania, systemie dystrybucji.

W ocenie autorów nasz kraj ani gospodarczo, ani technicznie na pewno w ogólności nie jest w fazie czwartej rewolucji przemysłowej. Dają się natomiast zauważyć symptomy tego, że jesteśmy niekiedy w fazie przemysłu 3.0, aczkolwiek nie są powszechne. Świadczą o tym niektóre nowoczesne technologie i wdrożenia w krajowym przemyśle i energetyce. Niestety w wielu zakładach przemysłowych problemem jest ich zwykłe funkcjonowanie na „poziomie przemysłu 3.0÷2.5”. Problemem jest zwyczajne zapewnienie ruchu danego zakładu, tzw. utrzymanie ruchu (działania o charakterze technicznym i organizacyjnym mające na celu zapewnienie wykonywania funkcji zadanych urządzeniom i maszynom danego zakładu przemysłowego). Przykładowy zakład przemysłowy powinien funkcjonować, produkować i sprzedawać swoje wyroby czy usługi. W ogólności można mówić o zagadnieniu utrzymania ruchu w przemyśle. Muszą funkcjonować wszystkie maszyny i urządzenia produkujące: i sterownik, i wentylator powietrza, i turbogenerator.

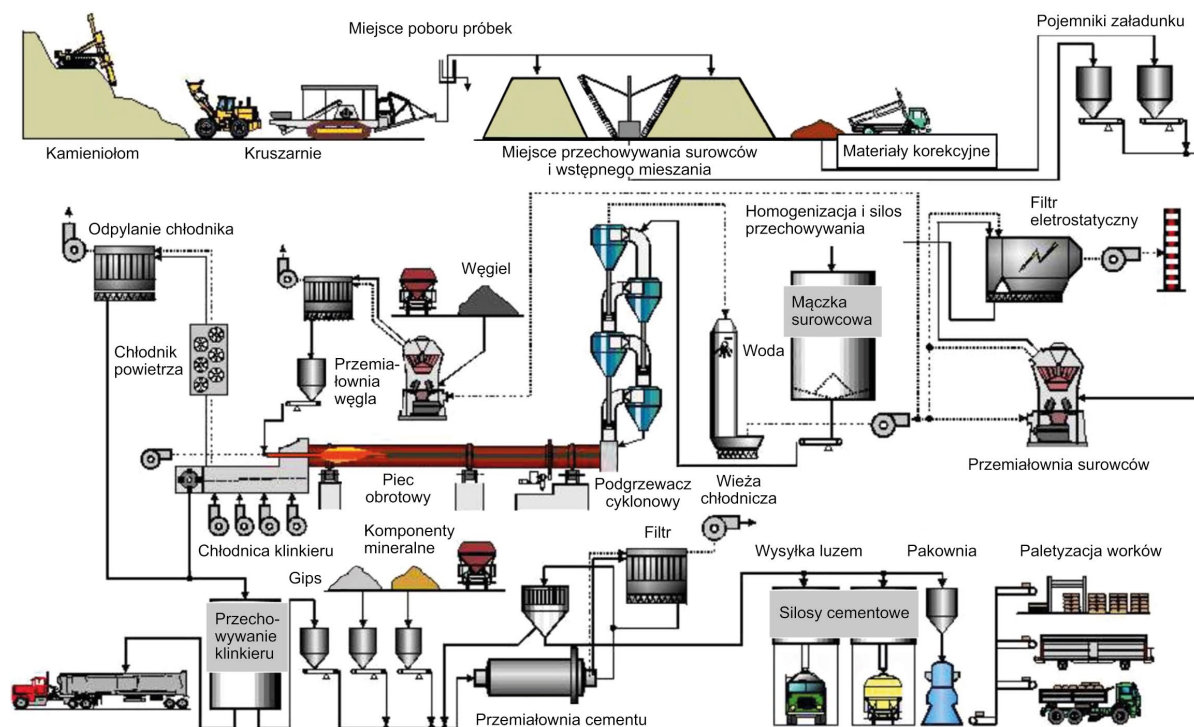
W utrzymaniu ruchu w przemyśle bardzo ważną rolę odgrywa system informatyczny zakładu, jego zabezpieczenia cybernetyczne oraz system diagnostyczno-kontrolny. Odgrywają one podstawową rolę w funkcjonowaniu oraz w ocenie stanu technicznego przykładowego sterownika, wentylatora powietrza czy

turbogenerators. Systemy te sterują urządzeniem, umożliwiając jego bezpieczną eksploatację i prowadzą diagnostykę eksploatacyjną nadzorowanego komponentu (przykładowego sterownika, wentylatora powietrza, turbogenerators).

W wielu przypadkach, szczególnie w zakładach o ruchu ciągłym (przemysł, energetyka, komunikacja, transport, łączność), gdzie awaryjne zatrzymanie zespołu maszynowego, komputera, serwera czy innego newralgicznego komponentu technicznego może doprowadzić do olbrzymich strat czy wręcz katastrofy technicznej i społecznej, ogromne znaczenie ma diagnostyka techniczna eksploatacyjna używanej przez człowieka infrastruktury technicznej. Pozwala ona wykryć początek uszkodzenia, początkowe symptomy uszkodzenia, zanim rozszerzy się ono do rozmiarów mogących spowodować awarię. Diagnostyka eksploatacyjna umożliwia wczesne dostrzeżenie niekorzystnych zmian zachodzących w używanej przez człowieka infrastrukturze technicznej, ustalenie ich przypuszczalnych źródeł i usunięcie przyczyn. Diagnostyka może być prowadzona offline, czujnikami diagnostycznymi i mobilną aparaturą diagnostyczno-kontrolną, a w wersji zaawansowanej – online – czujnikami diagnostycznymi i aparaturą diagnostyczno-kontrolną, stacjonarną, nazywaną bardzo często systemem monitoringu.

Krajowe piśmiennictwo techniczne dotyczące utrzymania ruchu w przemyśle [142, 143, 234, 241, 325] jest, w ocenie autorów, poświęcone zagadnieniom teoretycznym i wąskim zagadnieniom praktycznym. Niewiele jest pozycji traktujących kompleksowo kwestie utrzymania ruchu w danym zakładzie przemysłowym. Zagadnienie utrzymania ruchu w przykładowej krajowej elektrowni wraz z wiążącymi się z tym problemami przedstawiono w pracy doktorskiej Józefa Dwojaka [53]. Autor w pracy przeanalizował utrzymanie ruchu, sposób eksploatacji i stan diagnostyki w krajowych elektrowniach ciepłych, w szczególności w czterech elektrowniach o mocach bloków 360 MW i 200 MW. Krytyczna analiza doprowadziła do opracowania koncepcji utrzymania ruchu w elektrowni, opracowania nowej technologii diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych w elektrowni ciepłej na przykładzie PGE Elektrowni „OPOLE” SA. Opracowana technologia diagnostyki eksploatacyjnej miała doprowadzić i doprowadziła przede wszystkim do zwiększenia niezawodności pracy elektrowni, do wyraźnego zmniejszenia awaryjności wszystkich maszyn. Technologia ta zmienia sposób eksploatacji, zabezpieczenia i zarządzania maszynami w energetyce krajowej. Praca jest technologicznym wzorcem dla krajowych przedsiębiorstw energetycznych, które decydują się na wprowadzenie kompleksowego programu diagnostyki, zabezpieczenia i zarządzania maszynami. Zagadnieniu tym poświęcona jest również monografia [54].

Zagadnienie utrzymania ruchu w przykładowej krajowej cementowni z problemami w utrzymaniu ruchu przedstawiono w pracy doktorskiej Marka Kacperaka [114]. Zagadnieniu temu poświęcone są prace [115, 116] oraz niniejsza monografia. Rozwiązania podane w pracach [115, 116] oraz w monografii wprowadzono z bardzo dobrym skutkiem w praktyce przemysłowej. Niniejsza monografia przedstawia w głównej mierze utrzymanie ruchu w przemyśle, a jako przykład praktyczny wybrano Cementownię „ODRA” SA.



Rys. 4.
Schemat
procesu
produkcji
cementu
[131]

2. Produkcja cementu

Produkcję cementu poglądowo przedstawiono na rys. 4. Podstawowymi składnikami cementu są: kamień wapienny, glina i margiel. Wydobywane są w kopalniach metodą strzałową lub poprzez zastosowanie ciężkiego sprzętu mechanicznego. Powstały w ten sposób urobek za pomocą samochodów technologicznych transportowany jest do łamiarni, gdzie jest poddawany wstępnemu kruszeniu. Rozdrobniony surowiec jest transportowany przenośnikami taśmowymi do składu surowca. Jako dodatki do cementów stosuje się między innymi krzemionkę oraz rudę żelaza. Mieszanka surowcowa mielona jest w młynach rolowo-misowych lub rurowo-kulowych do momentu osiągnięcia pożądanej wielkości ziarna surowca. Po zmieleniu materiał gromadzony jest w zbiornikach mączki surowcowej w celu jego ujednorodnienia [131, 137]. Wypalanie klinkieru jest najważniejszą częścią procesu z punktu widzenia podstawowych kwestii ochrony środowiska związanych z produkcją cementu. Do wyprodukowania 1 tony klinkieru w UE zużywa się przeciętnie 1,52 tony surowców. Na różnicę tych wielkości składa się w większości strata z procesu w postaci dwutlenku węgla emitowanego do powietrza podczas reakcji kalcynacji [131].

Ogólnie specyfika procesu wypalania klinkieru umożliwia użycie odpadów w charakterze surowca lub paliwa. Klinkier wypala się w piecu obrotowym w temperaturze ok. 1450°C, metodą mokrą lub suchą w długim piecu, bądź metodą półmokrą lub półsuchą. W 2008 roku ok. 90% europejskiej produkcji cementu pochodziło z pieców działających metodą suchą, kolejne 7,5% produkcji odbywało się w piecach pracujących metodą półsuchą lub półmokrą, a reszta produkowanego w Europie cementu, ok. 2,5%, pochodziła z pieców na metodę mokrą. Generalnie przewiduje się, że działające w Europie piece metody mokrej zostaną w ramach modernizacji przekształcone w instalacje pracujące metodą suchą, podobnie jak piece metody półsuchej

i półmokrą [131]. Po wypale klinkier jest schładzany i składowany w silosach. Następnie klinkier przemiała się z gipsem i innymi składnikami i uzyskuje się drobny proszek – cement [131]. Schemat technologiczny produkcji cementu przedstawia rys. 4 [131].

3. Eksploatacja maszyn

Pod pojęciem eksploatacja maszyn i urządzeń rozumie się [143, 241]:

- prowadzenie ruchu tych maszyn i urządzeń;
- utrzymanie maszyn i urządzeń w należytym stanie technicznym.

Do czynności związanych z prowadzeniem ruchu maszyn i urządzeń są zaliczane [143, 241]:

- uruchamianie maszyn i urządzeń;
- obsługa w czasie pracy;
- zatrzymanie maszyn i urządzeń w czasie normalnej pracy i w stanie awaryjnym;
- prowadzenie zapisów ruchowych.

Prace związane z utrzymaniem maszyn i urządzeń w należytym stanie technicznym obejmują: oględziny, przeglądy, konserwacje i naprawy oraz prace kontrolno-pomiarowe umożliwiające ocenę ich stanu technicznego [143, 241].

W eksploatacji można wyróżnić [143, 241]:

- użytkowanie;
- obsługiwanie.

Użytkowanie to „wykorzystywanie obiektu technicznego zgodnie z jego przeznaczeniem i właściwościami funkcjonalnymi w celu zaspokojenia potrzeb ludzkich” [143, 241].

Obsługiwanie polega na „utrzymywaniu obiektu w stanie zdatności oraz przywracaniu obiektowi technicznemu wymaganych właściwości funkcjonalnych przez przeglądy, regulacje, konserwacje, naprawy i remonty” [143, 241].

Każda maszyna i urządzenie powinny podczas eksploatacji realizować cele, dla których zostały zaprojektowane. Ich przydatność dla potrzeb człowieka nazywa się jakością eksploatacyjną, która jest zbiorem istotnych cech określających stopień spełnienia wymagań odbiorcy [143, 241].

Efektywne działanie maszyn i urządzeń jest uzależnione od ich niezawodności oraz od jakości działań ludzi, którzy je eksploatują. Jakość maszyn i urządzeń ocenia się, sprawdzając ich cechy techniczno-użytkowe. W 1987 roku ustanowiono międzynarodowe normy ISO 9000, definiujące modele zapewniające jakość w projektowaniu, produkowaniu, instalowaniu i serwisie oraz badaniu maszyn i urządzeń.

Najważniejsze cechy techniczno-użytkowe maszyn i urządzeń to: przeznaczenie, wielkości charakterystyczne, wyposażenie, wydajność, dokładność, niezawodność, ergonomiczność oraz bezpieczeństwo i higiena pracy.

Na obsługę maszyn i urządzeń składają się [143, 241]:

- **przeгляд techniczny** – obejmuje czynności związane z regulacją zespołów i mechanizmów, usunięciem usterek i uszkodzeń, myciem i czyszczeniem, ustaleniem stopnia zużycia poszczególnych części i zespołów w celu określenia szczełowego zakresu naprawy [143, 241];
- **naprawa bieżąca** – obejmuje naprawę lub wymianę szybko zużywających się części; w zakres naprawy bieżącej wchodzi również wszystkie czynności przeglądu technicznego [143, 241];
- **naprawa średnia** – to naprawa lub wymiana szybciej zużywających się części zespołów w celu zapewnienia prawidłowej eksploatacji maszyny lub urządzenia do następnej naprawy średniej lub głównej; naprawa średnia obejmuje również wszystkie czynności naprawy bieżącej [143, 241];
- **naprawa główna** – obejmuje naprawę lub wymianę wszystkich części, a nawet całych zespołów ulegających zużyciu, w celu przywrócenia pierwotnej lub zbliżonej do pierwotnej wartości użytkowej maszyny lub urządzenia [241].

Ogólne zasady prawidłowej eksploatacji maszyn są opisane w literaturze, np. [35, 44, 53, 54, 79, 116, 120, 123, 180, 196, 266]. Pozycje najbardziej przydatne do praktycznego stosowania to wskazania producentów maszyn zawarte w tzw. *Dokumentacji techniczno-ruchowej*. Należy również pamiętać o stosownych normach oraz przepisach eksploatacji maszyn wydawanych przez upoważnione instytucje, organizacje techniczne bądź właścicieli i użytkowników.

Współcześnie, w okresie stale rosnących wymagań dotyczących wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle, koniecznością staje się właściwa diagnostyka maszyn i urządzeń. Ogólnie uważa się, że prowadzenie diagnostyki jest korzystne, ponieważ:

- zapewnia niezawodność maszyn i urządzeń;
- daje oszczędności dzięki zmniejszeniu kosztów ewentualnych napraw diagnozowanych maszyn i urządzeń;
- minimalizuje straty produkcyjne związane z realizowanym procesem technologicznym, w którym uczestniczą maszyny i urządzenia.

Często uszkodzenia niewielkich elementów maszyn i urządzeń skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych

prac remontowych. Prowadząc na bieżąco diagnostykę maszyn i urządzeń oraz monitorując parametry ich pracy, można uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn i urządzeń [79].

Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn oraz urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym mają decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [79, 266]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii maszyn i urządzeń, a w konsekwencji postoju maszyn. Do tego dochodzą często bardzo kosztowne naprawy. Konieczne jest dysponowanie na bieżąco informacjami o zmianach stanu dynamicznego maszyn i urządzeń, o stopniu zaawansowania ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń, aby zapobiec nieprzewidzianym awariom i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn i urządzeń opartej tylko na obserwacji przez obsługę jest niewystarczające. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwalają uniknąć awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas ich eksploatacji. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej zachęcają do intensywnego stosowania diagnostyki maszyn.

W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe i urządzenia można eksploatować na różne sposoby [27–31, 79, 266]:

- eksploatacja do wystąpienia awarii;
- eksploatacja planowo-zapobiegawcza;
- eksploatacja zależna od stanu maszyn i urządzeń;
- eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej oraz zależnej od stanu maszyn i urządzeń.

Takie ujęcie zagadnienia eksploatacji maszyn i urządzeń określa jednocześnie metody ich remontów. Wyróżnia się w związku z tym [27–31, 79, 266]:

- remont poawaryjny;
- remont zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji;
- remont uwarunkowany stanem technicznym;
- remont uwarunkowany okresem eksploatacji i stanem technicznym.

W metodzie eksploatacji zależnej od stanu technicznego każdy zespół maszynowy i urządzenie są traktowane w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, lecz uwarunkowany stanem technicznym zespołu maszynowego i urządzenia. Remont przeprowadza się tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne, a stan techniczny zespołu maszynowego i urządzenia określa się indywidualnie.

Spółród nowoczesnych metod badań diagnostycznych należy wyróżnić bardzo efektywne badania oparte na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn i urządzeń. Sygnałami tymi są między innymi sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach i urządzeniach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których częstotliwość leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu

MHz. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój i określać trend zmian – rys. 5.

Ocenę aktywności drganiowej zespołu maszynowego i urządzeń można wykonać z wykorzystaniem stosownych obowiązujących norm lub sprawdzonych i zalecanych kryteriów [27–31, 79, 216–229, 266]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania zespołu maszynowego bądź urządzenia. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.

Eksploatacja zespołów maszynowych i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych i w energetyce. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [27–31, 79, 216–229, 266]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [27–31, 79, 216–229, 266], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. W krajowych zakładach przemysłowych przed przejściem z eksploatacji planowo-zapobiegawczej do eksploatacji zależnej od stanu maszyn i urządzeń bardzo często stosuje się formę pośrednią, będącą połączeniem elementów wymienionych wyżej rodzajów eksploatacji. Jest to eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn i urządzeń.

Eksploatację planowo-zapobiegawczą prowadzi się najczęściej w zakładach, w których nie wszystkie ważne napędy są zdublowane, lub tam, gdzie nieplanowane zatrzymanie produkcji może powodować bardzo duże straty ekonomiczne i społeczne. Produkcję w takich zakładach zatrzymuje się w ściśle określonych terminach, a następnie prowadzi się remont zapobiegawczy. Jest to na przykład raz w roku.

Wskaźnik awaryjności wielu maszyn i urządzeń nie zmniejsza się w wyniku wymiany określonych części, np. łożysk, uszczelnień, pasków, łańcuchów. Bardzo często po takim remoncie, jak pokazuje praktyka przemysłowa, przynajmniej przez jakiś czas awaryjność maszyn i urządzeń wzrasta (wskutek niefortunnej ingerencji remontowca w maszyny i urządzenia). Pogorszenie się stanu technicznego danej maszyny i urządzenia jest sprawą bardzo indywidualną i nie da się ściśle na sztywno określić dla wszystkich maszyn i urządzeń (jednakowo) okresu bezawaryjnej ich eksploatacji. Okresy międzyremontowe są często określane statystycznie jako takie, podczas których oczekuje się, że nie więcej jak np. 2% maszyn i urządzeń nowych lub w pełni wyremontowanych ulegnie awarii. W eksploatacji planowo-zapobiegawczej bardzo często oddaje się do remontu maszyny i urządzenia, które tego remontu nie wymagają. Remont zapobiegawczy maszyn i urządzeń przy eksploatacji planowo-zapobiegawczej jest bardzo często technicznie i ekonomicznie nieuzasadniony.

Eksploatacja maszyn i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów o dużej kulturze technicznej jest strategią dominującą. Strategia ta, obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn i urządzeń, zwiększenie wydajności, eliminacja niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [27–31, 79, 216–229, 266]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [27–31, 79, 216–229, 266], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

4. Utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń

Utrzymanie ruchu jest terminem odnoszącym się do teorii, metod, technologii oraz technik, które są stosowane w celu zapewnienia sprawnego funkcjonowania maszyn i urządzeń [142, 143, 234, 241, 325].

Cele utrzymania ruchu są następujące [142, 143, 234, 241, 325]:

- osiągnięcie pożądanej jakości wyrobów lub usług;
- maksymalizacja ekonomicznego okresu użytkowania wyposażenia produkcyjnego;
- utrzymanie warunków bezpiecznej eksploatacji;
- maksymalizacja zdolności produkcyjnych oraz minimalizacja kosztów produkcji poprzez zapewnienie nielicznych przerw w procesie produkcji.

Zagadnienie utrzymania ruchu w danym przedsiębiorstwie musi być rozpatrywane w kontekście jego kondycji ekonomicznej. Na całkowity koszt produkcji w przedsiębiorstwach produkcyjnych wpływa wiele składników. Do podstawowych należą koszty materiałowe w procesie produkcji, koszty pracy, koszty eksploatacji maszyn i urządzeń, w tym koszty ich używania i serwisowania. Koszty te korelują z zapewnieniem oczekiwanej nieustannej dyspozycyjności, gwarantującej ciągłość produkcji [177]. Sytuacja konkurencyjna, w jakiej znajduje się przemysł, zmusza przedsiębiorstwa do intensywnego poszukiwania możliwości zmniejszenia udziału bezpośrednich kosztów utrzymania ruchu w kosztach zmiennych przedsiębiorstwa [143]. Rośnie nie tylko znaczenie samego utrzymania urządzeń w sprawności eksploatacyjnej, ale rosną także koszty utrzymania tej sprawności. Koszty utrzymania ruchu stanowią 4–13% obrotu (w zależności od branży) [143]. Obszar wszelkich działań w przedsiębiorstwie umożliwiających ciągłość w produkcji jest wyrazem realizacji przyjętej strategii eksploatacyjnej przedsiębiorstwa [143].

Optymalną metodą eksploatacji maszyn jest metoda eksploatacji zależna od ich stanu technicznego. Remont maszyny przeprowadza się tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Jedną z możliwych dróg obniżenia kosztów działalności w przedsiębiorstwach jest objęcie całego parku maszynowego kompleksowym programem zabezpieczenia, diagnostyki i zarządzania maszynami (systemem nadzoru maszyn). System

monitorowania i zabezpieczeń realizuje funkcję ochrony maszyn przed uszkodzeniami lub katastrofalnymi zniszczeniami w sytuacjach pogorszenia się ich stanu dynamicznego. System taki w połączeniu z odpowiednimi torami pomiarowymi pozwala zrealizować pełny nadzór zespołów maszynowych. Informacja o szybkości zmian stanu technicznego umożliwia określenie przewidywanego czasu niezbędnego do dokonania naprawy maszyny, w wielu sytuacjach zakresu takiej naprawy, a zatem w konsekwencji czasu potrzebnego na realizację zaplanowanych prac. Można powiedzieć, że właściwa gospodarka remontowa prowadzi do całkiem nowego pojęcia związanego z eksploatacją posiadanego parku maszynowego – zarządzania maszynami. Zarządzanie maszynami umożliwia obniżenie kosztów produkcji, wybór do eksploatacji maszyn o najlepszym stanie technicznym, planowanie zarówno zakresów, jak i kosztów remontów. Osiągnięcie tych celów jest możliwe, gdy systemy nadzoru maszyn zostaną uzupełnione systemami akwizycji danych diagnostycznych, ich archiwizacji i wizualizacji, systemami przetwarzania tych danych i ich analizy oraz systemami dostarczającymi informacje o stanie maszyn.

W opinii licznych praktyków zajmujących się diagnostyką maszyn i urządzeń w przemyśle uzasadnione organizacyjnie i ekonomicznie jest utrzymanie nadzoru diagnostycznego (Wydziałów Diagnostyki lub Wydziałów Diagnostyki i Kontroli Jakości) maszyn i urządzeń w strukturach właścicielskich przedsiębiorstwa [53, 54].

Współczesne koncepcje utrzymania ruchu, czyli systemy prognostyczne, doceniają znaczenie przeglądów i remontów [86, 142, 143]. Mówiąc o nich, ma się również na myśli:

- narzędzia do wspierania decyzji: ocena ryzyka, modele intensywności uszkodzeń i analiza ich efektów oraz systemy ekspertowe;
- nowe techniki utrzymania ruchu, np. monitorowanie stanu;
- zmiany w sposobie myślenia o organizacji – współuczestnictwo i praca zespołowa;
- usuwanie usterek i awarii;
- zapobieganie usterkom i awariom.

Do najważniejszych współczesnych koncepcji utrzymania ruchu zaliczyć należy [142, 143, 234, 325]:

- RCM (*Reliability Centered Maintenance*) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność – strategia wg niezawodności;
- TPM (*Total Productive Maintenance*) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją.

RCM ma na celu osiągnięcie poziomu niezawodności, który jest spójny z bezpieczeństwem, aspektami środowiskowymi, kosztami operacyjnymi oraz celami biznesowymi przedsiębiorstwa [234]. Strategia remontowa RCM opiera się na odpowiedziach na 7 pytań:

1. Jaka jest funkcja instalacji bądź maszyny?
2. Jaka utrata funkcji następuje w momencie awarii?
3. Jakie są przyczyny każdej utraty funkcji?
4. Co się dzieje w momencie każdej awarii?
5. Jakie są konsekwencje każdej awarii?
6. Co zrobić, aby zapobiec awarii lub ją przewidzieć?
7. Co należy zrobić, gdy nie ma możliwości zapobieżenia awarii?

Strategia RCM jest z sukcesem wdrażana w wielu zakładach przemysłu i energetyki w kraju, m.in. w GDF Suez Energy Polska oraz w Elektrowni Połaniec [234]. RCM jest wykorzystywany do budowy w danym zakładzie przemysłowym systemu utrzymania ruchu od podstaw. Szczególne znaczenie podczas wdrażania RCM przypisuje się pracy zespołowej. W pracach związanych z utrzymaniem ruchu muszą brać udział operatorzy maszyn i urządzeń [143].

TPM jest koncepcją utrzymania ruchu polegającą na wprowadzeniu autonomicznego utrzymania ruchu maszyn i urządzeń przez operatorów. Musi dojść do integracji procesu produkcji z procesem obsługowym. Do obowiązków operatorów należą wówczas [143]:

- konserwacja;
- czynności inspekcyjne;
- proste prace naprawcze;
- współdziałanie z obsługą remontową podczas przestoju maszyn i urządzeń.

System utrzymania ruchu TPM stosuje z powodzeniem koncern Toyota.

W literaturze specjalistycznej [142, 143] opisano inne współczesne sposoby utrzymania ruchu maszyn i urządzeń w przemyśle i energetyce.

5. Diagnostyka eksploatacyjna maszyn w przemyśle

Wskutek wzrastającej wartości maszyn i urządzeń w przemyśle uwaga służb utrzymania ruchu i służb eksploatacyjnych jest skierowana na unowocześnianie zasad eksploatacji i serwisu wyposażenia technicznego. W wielu krajach technicznie i ekonomicznie wysoko rozwiniętych, w tym również coraz częściej i u nas, dostrzega się znaczące źródło efektów ekonomicznych, które daje przyjęcie zasad eksploatacji maszyn uzależnionych od ich stanu technicznego. Odchodzi się od zasad eksploatacji „do awarii” oraz zasad uwzględniających normatywy czasu pracy. Wprowadza się diagnostykę, bieżący nadzór oraz monitorowanie stanu technicznego maszyn i urządzeń. Intensywnie rozwijający się przemysł, zwłaszcza w ostatnich latach, wytwarza coraz to bardziej skomplikowane maszyny i urządzenia i korzysta z nich. Stawiane są żądania wysokiej efektywności i niezawodności. Od inżynierów żąda się maksymalnego skrócenia i potanienia procesu wytwarzania danego produktu oraz jak najdłuższego utrzymywania maszyn i urządzeń produkcyjnych w stanie zdatności do prawidłowego działania. Pociąga to za sobą konieczność opracowania i ciągłego udoskonalania metod umożliwiających zbieranie oraz analizowanie informacji o właściwościach funkcjonujących maszyn oraz o ich stopniu zdatności do wykonywania przewidzianych przez inżynierów zadań. Można powiedzieć, że są co chwile stawiane pytania: jaki jest stan techniczny maszyny, jak się ona zachowuje, czy ma jakieś uszkodzenia? Efektywna organizacja procesów zmierzających do odpowiedzi na te pytania jest podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej [35, 36]. Przesłanki [35, 36, 266] do obiektywnej oceny stanu danej maszyny dają pomiary dostępnych do obserwacji symptomów (objawów) stanu technicznego, a na podstawie otrzymanych danych wyciąga się wnioski.

Symptom stanu jest opisany trzema grupami parametrów i charakterystyk możliwych do obserwacji. Są to:

- parametry funkcjonalne, robocze maszyny elektrycznej (np. moc, prędkość, prąd);
- parametry i charakterystyki będące bezpośrednim symptmem zużycia (np. luzy, odchyłki kształtu i wymiarów w stosunku do wzorca);
- parametry procesów resztkowych (np. drgań, hałasu, strumienia osiowego, wyładowań niezupełnych).

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i złomowanie, rys. 5 [266]. Na etapie każdego z nich należy prowadzić stosowną diagnostykę. Na podstawie analizy sygnałów generowanych przez maszyny i urządzenia określa się ich stan, przewidując przy tym terminy koniecznych przeglądów i remontów, rys. 6.

Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania oparte na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Sygnałami tymi są m.in. sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których zakres częstotliwości leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu MHz [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266]. Sygnały wibroakustyczne towarzyszące pracy maszyn, jak wykazują badania [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266], stanowią odbicie najistotniejszych zjawisk fizycznych zachodzących w maszynach, takich jak odkształcenia i naprężenia, współdziałanie poszczególnych części i podzespołów maszyn, stany przedawaryjne i awaryjne. Od przebiegu tych procesów w sposób zasadniczy zależy zdolność maszyn do prawidłowego ich funkcjonowania.

Sygnał wibroakustyczny towarzyszący pracy danej maszyny przedstawia swoiste odwzorowanie stanu technicznego maszyny. Przyjmuje się [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266], że aby sygnał mógł być wykorzystany jako nośnik informacji o stanie maszyny, musi istnieć jednoznaczna relacja pomiędzy stanem maszyny a strukturą sygnału. Niech x będzie wektorem w przestrzeni P -wymiarowej i niech odwzorowuje przez swoje składowe stopnie swobody źródła sygnału wibroakustycznego (np. maszyny elektrycznej) [10, 11].

$$x = \text{col} (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_p) \quad (1)$$

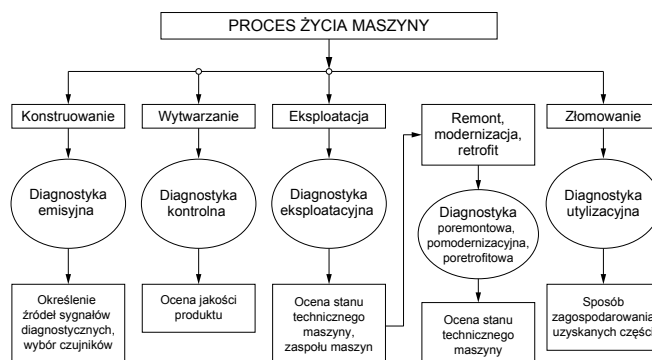
gdzie: col – oznaczenie wektora kolumnowego.

Zmiana stanu źródła może być procesem ciągłym lub skokowym. Zmianę stanu maszyny elektrycznej jako źródła wibroakustycznego w czasie t_1 i t_2 określa wyrażenie:

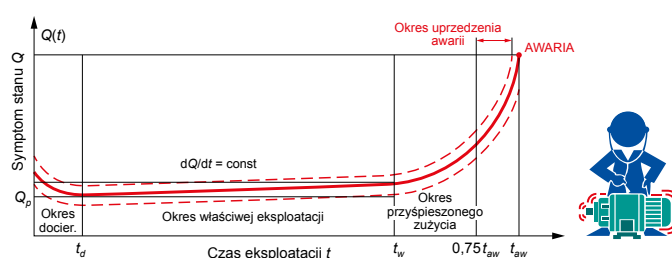
$$x(t_1) = x(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx}{dt} dt = \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_1}{dt} dt, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_2}{dt} dt, \dots, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_p}{dt} dt \right) \quad (2)$$

gdzie: $x(t_1)$, $x(t_2)$ – stany źródła wibroakustycznego w chwilach t_1 , t_2 ; $\frac{dx}{dt}$ – prędkość zmiany stanu źródła wibroakustycznego.

Miarą zmiany stanu źródła może być iloczyn skalarny



Rys. 5. Cele diagnostyki na poszczególnych etapach „życia” maszyny elektrycznej



Rys. 6. Idea diagnostyki eksploatacyjnej maszyn – krzywa „życia maszyn”

wektorów $x(t_1)$ i $x(t_2)$ lub odległość metryczna w przestrzeni P -wymiarowej, np.:

$$d[x(t_1), x(t_2)] = \left[\sum_{p=1}^P (x(t_{1,p}) - x(t_{2,p}))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Aby sygnał wibroakustyczny u mógł odwzorowywać stan maszyny elektrycznej jako obiektu rozpoznawalnego, układ równań (3) musi spełniać warunek rozpoznawalności, tzn.:

$$x(t_1) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (4)$$

$$x(t_2) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (5)$$

$$x(t_p) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (6)$$

gdzie

$$u = \text{col} (u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (7)$$

Możliwość odwzorowania stanu maszyny jest zależna od cech fizycznych źródła sygnału wibroakustycznego oraz od parametrów samego sygnału. Zakres zastosowań sygnałów wibroakustycznych towarzyszących pracy maszyn, w tym maszyn elektrycznych, do oceny ich stanu jest bardzo duży. Wynika to między innymi z faktu, że procesy wibroakustyczne generujące sygnały wibroakustyczne mają dużą pojemność informacyjną i dużą szybkość przekazywania informacji o stanie dynamicznym maszyny. Z teorii maszyn i z praktyki eksploatacji maszyn wynika, że na ich dynamikę istotny wpływ

wywierają właściwości dynamiczne elementów sprzęgających poszczególne części maszyn oraz elementy maszyn najczęściej ulegające uszkodzeniom. Wynika z tego, że analizując drgania danej maszyny, trzeba zwrócić szczególną uwagę na drgania generowane przez te właśnie elementy. Oznacza to w przypadku analizy drgań silników elektrycznych konieczność określenia właściwości dynamicznych łożysk jako elementów sprzęgających część nieruchomą (stojan, korpus) z częścią ruchomą (wirnikiem). Zdolność do przenoszenia informacji przez sygnał wibroakustyczny o szerokości widma ΔF [Hz] i czasie trwania T [s] zależy od względnego stosunku mocy sygnału użytecznego N_s do sygnału zakłócającego N_n . Określa to wzór Shannona [13]:

$$Q = T \Delta F \log_2 (1 + N_s/N_n) \text{ [bit/s]} \quad (8)$$

gdzie: Q – ilość informacji podawana w bitach.

Szybkość przekazywania informacji określa relacja:

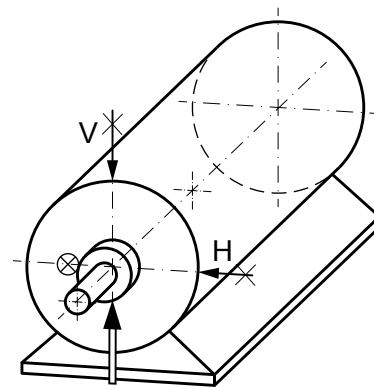
$$C = \frac{Q}{T} = \Delta F \log_2 (1 + N_s/N_n) \text{ [bit/s]} \quad (9)$$

Dla przykładu rozpatrzmy silnik elektryczny klatkowy, będący napędem wentylatora spalin. Załóżmy, że mamy ocenić stan techniczny łożysk tocznych silnika. Obserwację, pomiar i analizę sygnału drganiowego węzłów łożyskowych, a konkretnie przyspieszenia drgań, prowadzimy w paśmie $F = 0\text{--}40$ kHz w punktach pomiarowych przedstawionych na rys. 7. Załóżmy, że stosunek sygnału użytecznego do sygnału zakłóceń wynosi $N_s/N_n = 15$. Korzystając ze wzoru (9), obliczamy $C = 8 \cdot 10^4$ bit/s. Z przytoczonego przykładu widać, że szybkość przekazywania informacji o stanie łożyska tocznego silnika przez sygnał wibroakustyczny jest bardzo duża. Zrozumiałe jest więc szerokie zastosowanie diagnostyki wibroakustycznej do oceny stanu technicznego maszyn. Powyższy przykład określa również wymagania względem aparatury pomiarowej.

6. Symptomy uszkodzeń – zagadnienia ogólne

Określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego maszyn musi być poprzedzone analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii lub do zatrzymania napędu i wykonania remontu. Trzeba prześledzić możliwą „drogę” powstawania uszkodzenia w układzie napędowym i określić symptomy towarzyszące jego eksploatacji, które będą występowały już na początku pojawienia się uszkodzenia w możliwie najkrótszym czasie podczas eksploatacji napędu. W publikacji [266] przedstawiono szczegółowo powyższe zagadnienie. Zwrócono uwagę na bardzo złożony mechanizm powstawania przydatnych diagnostycznie wielkości fizycznych umożliwiających określenie stanu technicznego napędu, a silnika w szczególności.

Nie sposób ograniczyć się tylko do silnika. Wzajemne oddziaływanie pomiędzy silnikiem, sprzęgłem, maszyną napędzaną oraz fundamentem, konstrukcją wsporczą i elementami mocowania są natury podstawowej i decydują o koniecznym „uogólnionym” sposobie podejścia do diagnostyki eksploatacyjnej wspomnianych silników w przemyśle. Bardzo często o złej pracy



Rys. 7.

Przykładowe punkty pomiaru drgań w silniku: wg norm [190, 191] strzałki pojedyncze i wg propozycji autora – strzałka podwójna [266]

silnika, np. o jego bardzo dużych drganiach, decyduje nie jego stan techniczny, a uszkodzone sprzęgło, niewyważony wentylator czy luz w mocowaniu do fundamentu [266]. Ograniczenie się w rozważaniach tylko do samego silnika nie doprowadziłoby, jak pokazuje praktyka, do pozytywnych rezultatów. Określenie, identyfikacja symptomów umożliwiających przeprowadzenie diagnostyki jest możliwe przy wykorzystaniu eksperymentu diagnostycznego lub na drodze modelowania matematycznego. Każda z tych metod ma swoje silne i słabe strony. Wiele z nich z upływem czasu nie jest stosowanych ze względu na ograniczenia przemysłowe, np. zakłócenia, ograniczenia metrologiczne. Pojawiają się natomiast nowe metody, które są rezultatem najnowszych badań, polegające np. na wykorzystaniu wyładowań niezupełnych do określenia stanu technicznego izolacji uzwojeń silników w warunkach online. Intensywny rozwój elektroniki, zwłaszcza cyfrowej, oraz rozwój technik komputerowych umożliwia budowanie z dostępnych już prawie powszechnie komponentów złożonych układów diagnostycznych, których przydatność można sprawdzać w przemyśle.

7. Kryteria oceny stanu dynamicznego maszyn, wartości graniczne pracy maszyn

Ocena intensywności drgań, poziomu ciśnienia akustycznego maszyn, w tym silników elektrycznych nowo wyprodukowanych oraz po remoncie, powinna być wykonana na stacji prób u producenta, w zakładzie remontowym bądź u użytkownika na specjalnym stanowisku badawczym metodami opartymi na obowiązujących normach lub uzgodnionych pomiędzy zainteresowanymi. Ocena maszyn powinna być wiarygodna i jednoznaczna [266].

Ocenę eksploatowanych zespołów maszynowych należy wykonać na podstawie pomiarów bieżących na stanowisku pracy tych zespołów, opierając się na kryteriach oceny stanu technicznego maszyn i ich wartościach granicznych [266].

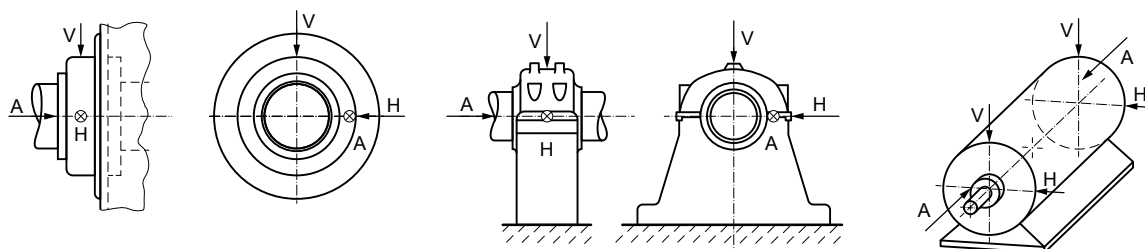
W Unii Europejskiej tylko normy dotyczące bezpieczeństwa są obowiązkowe (np. w budownictwie), pozostałe są nieobowiązkowe, aczkolwiek zalecane do stosowania.

7.1. Ocena drganiowa maszyn

Formalne kryteria oceny drgań maszyn i urządzeń są ustalone w normach, które można podzielić na następujące cztery rodzaje [266]:

- normy odbiorcze, określające dla maszyn lub urządzeń dopuszczalny stan wibracyjny, który jest jednym z mierników dokładności wykonania i montażu;

Rys. 8. Punkty pomiarowe w silniku poziomym wg norm [190, 191]



- normy eksploatacyjne, definiujące dopuszczalny stan wibracyjny pracujących maszyn i urządzeń;
- normy sanitarne, obligujące do zmniejszenia szkodliwości wpływu drgań maszyn i urządzeń na zdrowie człowieka;
- normy odporności wibracyjnej, wskazujące dopuszczalny poziom drgań pochodzących ze źródeł zewnętrznych, które mogą działać w sposób szkodliwy na maszyny i urządzenia.

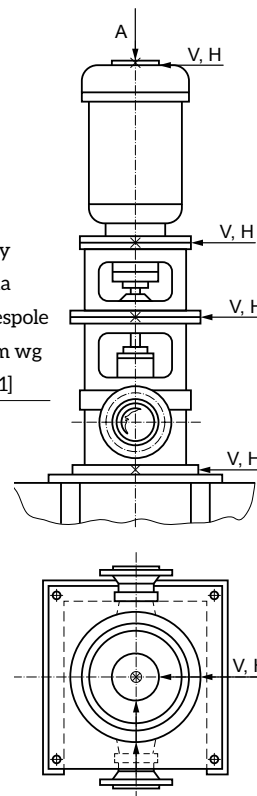
Z upływem czasu obserwuje się systematyczne zaostżenie norm zarówno międzynarodowych, jak i krajowych, powodowane m.in. rozwojem technologii wytwarzania maszyn. Zaostżenie norm ma zachęcić producentów maszyn do poprawy jakości nowych maszyn, a użytkowników do lepszej dbałości o ich stan dynamiczny. Przy okazji nowe wymagania „pogarszają” stan techniczny starych maszyn. Służby techniczne stosują bowiem zaostżone nowe normy do maszyn, które wytworzono, gdy poziom technologii był niższy, a obowiązujące wówczas wymagania były łagodniejsze [266].

7.2. Kryteria oceny stanu drganiowego maszyn, wartości graniczne pracy maszyn

Najprostszą i najstarszą metodą diagnozowania maszyn wirujących są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań, które są oparte na śledzeniu trendu zmian poziomu prędkości (głównie Europa) lub przyspieszenia drgań (głównie Ameryka, rzadziej Europa) w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny. Zakres częstotliwości zależy od rodzaju maszyny [190, 191]. Zakres niezbędny do oceny maszyny z łożyskami tocznymi powinien zawierać częstotliwości wyższe niż w przypadku maszyny z łożyskami ślizgowymi. Dla silników WN (wysokiego napięcia) częstotliwości żłobkowe znajdują się powyżej 1 kHz. Oznacza to, że zakres pomiarowy powinien obejmować co najmniej pasmo 10 Hz – 2,0 kHz [190, 191]. Dla maszyn wolnoobrotowych zalecana jest dolna granica częstotliwości na poziomie 2 Hz. Należy zwrócić uwagę na istotną różnicę w stosunku do poprzednich wymagań normowych. W przeszłości intensywność drgań wyznaczała wartość skuteczną prędkości drgań mierzoną w paśmie 10 Hz – 1 kHz.

Wielkości otrzymane z pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny, są porównywane z dopuszczalnymi granicznymi poziomami wibracji określonymi w normach ISO 10816 oraz ISO 7919 (pomiary drgań względnych wałów) i na tej podstawie maszyna jest oceniana, a następnie jest podejmowana decyzja o dalszej eksploatacji lub zatrzymaniu danej maszyny. Według normy ISO 10816 w celu oceny stanu technicznego maszyny należy wykonać pomiary wartości skutecznej prędkości drgań w ustalonym zakresie częstotliwości (V_{RMS}) w punktach przedstawionych na rys. 8 i 9 oraz porównać wyniki ze wskazaniem

Rys. 9. Punkty pomiarowe na pionowym zespole maszynowym wg norm [190, 191]

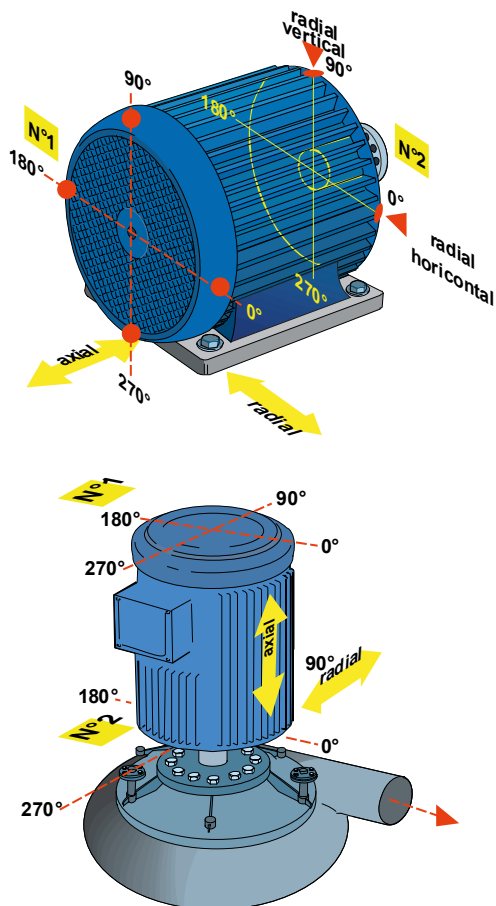


norm. Natężenie drgań maszyny to największa ze zmierzonych wartości V_{RMS} w punktach pomiarowych.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \tag{10}$$

gdzie: V_{RMS} – wartość skuteczna prędkości drgań w określonym przedziale częstotliwości; T – przedział czasu, dla którego określa się V_{RMS} , czas całkowania; $v(t)$ – prędkość drgań, sygnał prędkości drgań.

Bezwzględne wartości V_{RMS} podane przez normy nie zawsze są trafne, zważywszy na indywidualne cechy poszczególnych maszyn oraz impedancję mechaniczną w punkcie pomiaru, niemniej są one ogólnie użyteczne. Wskazują bowiem na znaczenie wzrostu poziomu drgań w różnym stopniu dla różnych maszyn. Norma ISO 10816 (rys. 12) stwierdza, iż 2,5-krotny wzrost wartości V_{RMS} (o 8 dB) jest zmianą istotną, ponieważ pokrywa jedną klasę jakości. Wzrost 10-krotny (o 20 dB) lub większy jest poważny, ponieważ może zmienić klasyfikację maszyny – „dobry stan techniczny” na „nie dopuszczalny stan techniczny”.



Rys. 10. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego silnika poziomego i pionowego [190, 191, 192]

W praktyce diagnostycznej wykonuje się pomiary drgań na obudowie łożysk lub na tarczach łożyskowych w obszarze największej sztywności albo na korpusie maszyny w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (x , y , z) w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału w kierunku poziomym i pionowym oraz wzdłuż osi wału na wysokości osi, możliwie jak najbliżej wału. Ilustrują to rys. 10 i 11.

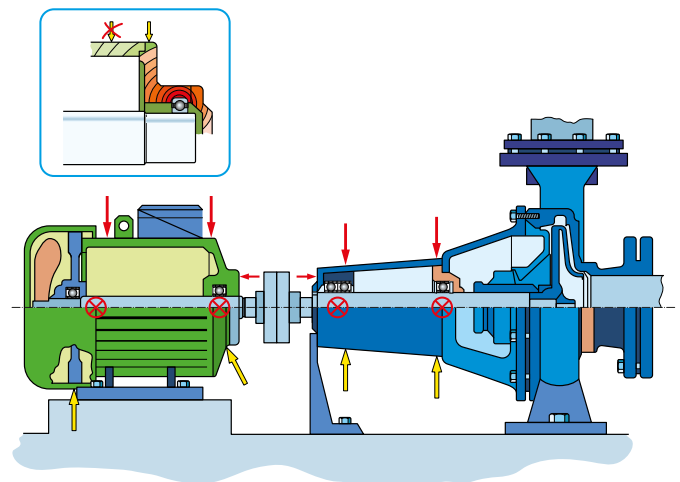
Oceniając stan drganiowy maszyn, utożsamiany z ich stanem dynamicznym, w praktyce przyjmuje się najczęściej podział na cztery strefy dynamiczne:

A – stan dobry (na rys. 12 kolor niebieski) – poziom drgań nowo oddanych do eksploatacji maszyn powinien zawierać się w tym zakresie;

B – stan użyteczny (na rys. 12 kolor zielony) – maszyny, których poziom drgań zakwalifikowano do tej strefy, mogą pracować długotrwale bez ograniczeń;

C – stan warunkowo dopuszczalny (na rys. 12 kolor żółty) – maszyny, których poziom drgań zawiera się w tej strefie, uważa się zwykle za nienadające się do długotrwałej pracy ciągłej; na ogół maszyna może pracować przez ograniczony czas, aż będzie możliwość podjęcia działań zapobiegawczych, remontowych;

D – stan niedopuszczalny (na rys. 12 kolor czerwony) – wartości poziomu drgań w tej strefie są uważane za zbyt duże i wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzenia maszyny; po osiągnięciu takiego poziomu drgań maszynę należy wyłączyć.



Rys. 11. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego agregatu pompowego [190, 191, 192]

								Przykładowe drgania	
								mm/s rms	inchs rms
								11	0,44
								7,1	0,28
								4,5	0,18
								3,5	0,11
								2,8	0,07
								2,3	0,04
								1,4	0,03
								0,71	0,02
								mm/s rms	inchs rms
sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	Fundament	
pompy > 15 kW promieniowe, osiowe				średnie maszyny 15 kW < P ≤ 300 kW		duże maszyny 300 kW < P ≤ 50 MW		Typ maszyny	
napęd bezpośredni		napęd zewnętrzny		silniki 160 mm ≤ H < 315 mm		silniki 315 mm ≤ H		Grupa	
Grupa 4		Grupa 3		Grupa 2		Grupa 1			

Rys. 12. Graniczne dopuszczalne poziomy wibracji wg normy PN-EN-ISO 10816 [192]

7.3. Podział maszyn na grupy dynamiczne

Ze względu na grupy dynamiczne maszyn w praktyce przyjmuje się najczęściej podział przeprowadzony stosownie do typu maszyny, jej mocy znamionowej lub wzniosu osi wału, zgodnie z normą ISO 10816:

Grupa 1: Wielkie maszyny o mocy znamionowej ponad 300 kW; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału $H \geq 315$ mm (maszyny te mają zazwyczaj łożyska ślizgowe, zakres prędkości obrotowych rozciąga się od 120 obr./min do 15 000 obr./min).

Grupa 2: Maszyny o średniej mocy znamionowej – powyżej 15 kW aż do 300 kW włącznie; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału $160 \text{ mm} \leq H \leq 315 \text{ mm}$ (maszyny te mają zazwyczaj łożyska toczne i prędkości obrotowe powyżej 600 obr./min).

Grupa 3: Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z oddzielnym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie lub o przepływie osiowym), o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

Grupa 4: Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z wbudowanym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie i o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW

Tabela 1. Klasyfikacja stref dla poszczególnych grup maszyn – drgania bezwzględne [192]

Grupa	Posadowienie	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna V_{RMS} [mm/s]
1	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
2	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
4	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1

Tabela 2. Klasyfikacja stref dla maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW – drgania bezwzględne [192]

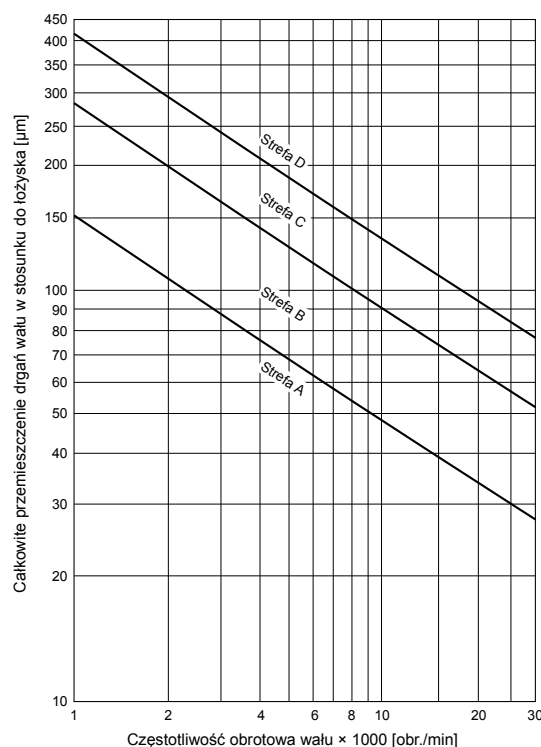
Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna V_{RMS} [mm/s]
A/B	0,71
B/C	1,80
C/D	4,50

(maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

Dodatkowo, do czasu ukazania się stosownej części ISO 10816, wyróżniano grupę maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW.

Wymagania drganiowe wobec maszyn przedstawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rys. 12 i 13.

Asortyment maszyn w cementowniach jest bardzo zróżnicowany zarówno pod względem konstrukcji i wielkości, jak i pod względem parametrów kinematycznych. O ile różnorodność konstrukcji i wielkość maszyn nie stwarzają poważniejszych przeszkód w ocenie stanu technicznego maszyn metodami wibroakustycznymi, o tyle w przypadku maszyn wolnoobrotowych występują problemy techniczne. Problemy te występują zarówno przy określaniu związku symptomów drganiowych z rodzajem i miejscem występowania usterki, jak i od strony pomiarowej. Pomiar drgań niskich częstotliwości są stosunkowo trudne do wykonania. Choć dolna granica pomiaru sejsmicznych przetworników drgań (akcelerometrów) będących na wyposażeniu służb diagnostycznych cementowni wynosi najczęściej 0,2 Hz, to przyrządy pomiarowe zazwyczaj nie umożliwiają dokonania wiarygodnych pomiarów przy tak niskich częstotliwościach (ograniczenia w czasach całkowania). Te ograniczenia nie wykluczają jednak możliwości wdrożenia diagnostyki eksploatacyjnej, gdyż składowe niskoczęstotliwościowe rzadko są wykorzystywane jako symptomy diagnostyczne.



Rys. 13. Klasyfikacja stref dla poszczególnych maszyn – drgania względne [192]

Drgania o niskich częstotliwościach są bardzo słabo tłumione przez konstrukcje i przenoszone są na znaczne odległości. Z tych względów należy się liczyć z obecnością w sygnale drganiowym zakłóceń przypadkowych pochodzących z oddalonych źródeł – drgania własne budynków, hal, konstrukcji. Pomiar w niskim zakresie częstotliwości wymagają bardzo długich czasów uśrednień. Wystąpienie tego rodzaju drgań najczęściej nie powoduje gwałtownych uszkodzeń maszyn.

Przypisy

- 1 Z ang. QR Code, czyli *Quick Response Code*, to modułowy kod stałowymiarowy (o postaci kwadratu wypełnionego ciemnymi i jasnymi polami), umożliwiający zapisanie dużej ilości danych.
- 2 System cyberfizyczny to połączenie komponentów informacyjnych oraz programistycznych z częściami mechanicznymi i elektrycznymi, które komunikują się za pośrednictwem infrastruktury danych, takiej jak np. Internet. Cechą charakterystyczną systemu cyberfizycznego jest wysoki stopień złożoności. Tworzenie systemów cyberfizycznych odbywa się poprzez łączenie w sieci zintegrowanych systemów na drodze komunikacji przewodowej bądź bezprzewodowej (Wikipedia, dostęp: 02.06.2020 r.).

Bibliografia dostępna pod linkiem: nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki:

Utrzymanie ruchu w przemyśle,

Stawomir Szymaniec, Marek Kacperak

Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021

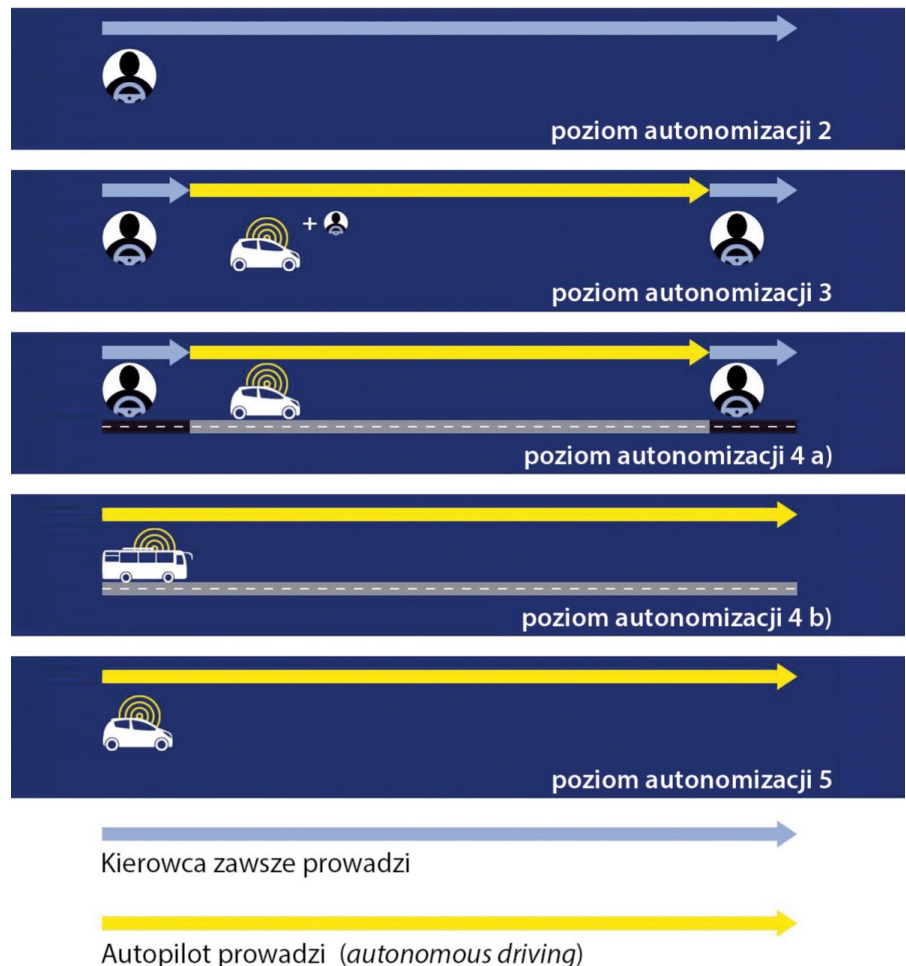
Pojazdy autonomiczne. Wstęp

Włodzimierz Choromański, Iwona Grabarek, Maciej Kozłowski, Andrzej Czerepicki, Katarzyna Anna Marczuk

Niewątpliwie rozważania należałoby zacząć od definicji – co rozumiemy przez pojęcie pojazdu autonomicznego? Odpowiedź na to pytanie wcale nie jest prosta. W literaturze, w wielu rozważaniach naukowych istnieje bardzo dużo definicji tego pojęcia. Co więcej, problematyczne jest używanie go w odniesieniu do niektórych technologii kierowania pojazdami. Terminologia obecnie używana nie jest jednolita, np. pojazdy autonomiczne, pojazdy automatyczne, CAD, platooning, ADAS itp. Ujednoliceniu niektórych pojęć służy klasyfikacja SAE (*Society of Automotive Engineers*), choć i ona nie jest jednoznaczna (stopień automatyzacji podzielono na pięć poziomów). W przekonaniu autora można by postarać się o inną definicję: przez pojazd autonomiczny rozumiemy taki, który posiada następujące cechy:

- kieruje samodzielnie, czasowo lub ciągle, tzn. eliminuje całkowicie lub częściowo udział kierowcy;
- pozwala na inteligentny wybór trasy (w zależności od celu podróży) oraz wykonanie manewrów (adekwatnych do aktualnej sytuacji na drodze).

Ta definicja, jakkolwiek też niedoskonała, ukierunkowuje na przedmiot rozważań w niniejszym artykule. W rozumieniu powyższej definicji za pojazd autonomiczny nie można uznać tramwaju bez motorniczego (metro bez motorniczego jest już powszechnie stosowane, np. w Kopenhadze). Kluczowego znaczenia nabiera problem, jakie manewry może wykonywać pojazd. Obok podstawowego manewru hamowania oraz rozpoznania podstawowych reguł ruchu można analizować inne, jak zmianę pasa ruchu, omijania i wyprzedzania, realizację zasady ograniczonego zaufania itp. Skala trudności w zależności od możliwości wykonania tych manewrów zmienia się zasadniczo. Prowadzenie pojazdu w trybie autonomicznym wymaga rozwiązania wielu trudnych interdyscyplinarnych problemów.



Rys. 1. Poziomy automatyzacji według klasyfikacji SAE uogólnionej w raporcie

Źródło: opracowanie własne

1. Określenia metody identyfikacji położenia pojazdu (z dokładnością do 1–2 cm) i skorelowania go z aktualną mapą dróg.
2. Zdefiniowania metody rozpoznawania obiektów przez układ sensoryczny pojazdów oraz oprogramowanie.
3. Określenia metody podejmowania decyzji o koniecznych manewrach.
4. Określenia procedury dopuszczenia pojazdów do ruchu, oceny bezpieczeństwa.
5. Rozwiązania nieprostych problemów legislacyjnych, w tym odpowiedzialności

za ewentualne wypadki, oraz przeszkolenia (w porównaniu z tradycyjnym prawem jazdy) użytkowników pojazdów autonomicznych.

Wspomniana klasyfikacja SAE dzieli stopień automatyzacji na pięć poziomów (rys. 1).

Poziom L1 odnosi się do samochodów niewyposażonych w żadne mechanizmy do wspomagania kierowania pojazdem, a więc tym bardziej w układy zorientowane na automatyzację. Taki stan występował w przemyśle motoryzacyjnym

do lat 70. ubiegłego wieku. Poziom L2 charakteryzuje się wprowadzaniem niektórych elementów autonomizacji. Kierowca cały czas musi trzymać ręce na kierownicy i w pełni kontrolować prowadzenie samochodu, ale kierowanie pojazdem może być wspomagane np. dynamicznym tempomatem, automatycznym utrzymaniem pasa ruchu (podczas jazdy po torze zakrzywionym) itp. Badania i projekty dotyczące poziomu L2 pojawiły się pod koniec XX wieku, przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych na uniwersytetach Stanforda i Berkeley. Określane były terminem AVCS (*Advanced Vehicle Control Systems*). Podobne programy realizowano w tym samym okresie w Europie.

Początek wieku XXI charakteryzuje się wykorzystaniem w motoryzacji nowoczesnych technologii informatycznych (*software i hardware*). Wynikiem tego są próby wprowadzenia poziomu L3, czyli tzw. warunkowej autonomizacji. Polega on na tym, że wprawdzie kierowca musi cały czas kontrolować drogę, ale system jest przygotowany do autonomicznej (bez udziału kierowcy) jazdy. W sytuacjach zagrożenia kierowca musi być w stanie w każdej chwili przejąć całkowitą kontrolę nad pojazdem. Jest to krytyczny moment. Dopuszczenie do ruchu pojazdów na poziomie L3 jest dyskusyjne. Dobrym przykładem, który ilustruje pojawiające się wątpliwości, jest wypadek (z ofiarą śmiertelną) samochodu Volvo XC90 (wyposażonego w układ autonomicznej jazdy na poziomie L3) należącego do korporacji Uber. Samochód śmiertelnie potrafił kobietę przechodzącą przez jezdnię w niedozwolonym miejscu. Zawiodły: przeszkolenie kierowcy (kierowca nie zajmował się śledzeniem drogi, czego wymaga poziom L3), układ HMI oraz przede wszystkim oprogramowanie.

Bardzo ciekawie, a zarazem niekלארownie jest zdefiniowany poziom autonomizacji L4. W raporcie autorstwa L. Fraade-Blanar, M.S. Blumenthal, J.M. Andersona i N. Karli, *Measuring Automated Vehicle Safety. Forging a Framework*, Rand Corporation, Santa Monica, California 2018, zdefiniowano nawet dwa poziomy L4: a i b. Najogólniej



Rys. 2. Miniautobus firmy 2getthere zaprojektowany dla miasta Rzeszów

Źródło: opracowanie własne

ujmując, pojazd na tym poziomie nie ma kierowcy, więc teoretycznie może się poruszać autonomicznie, ale obszar i drogi, po których jedzie, są ściśle określone. W skrajnych przypadkach (L4b) mamy do czynienia ze swoistym pojazdem torowym, z tym że tor nie ma charakteru mechanicznego. Jest wyznaczany z wykorzystaniem systemów lokalizacji pojazdu i złożonych systemów informatycznych z algorytmami rozpoznawania obrazów. Bardzo często do prowadzenia pojazdu wykorzystywane są przestrzenne mapy cyfrowe. Przykładem takiej autonomizacji są miniautobusy firm Navya czy 2getthere.

Zauważmy, że na poziomie L4 zacierają się różnice między pojazdem torowym a niektórymi pojazdami autonomicznymi. Cały czas mamy rodzaj „toru” (na poziomie L4), jakkolwiek jest to tor niemechaniczny. Często (przynajmniej z wykorzystaniem współczesnych technologii) rozwiązania na poziomie L4 umożliwiają bardzo zawężony zbiór manewrów. Dla miniautobusów wymienionych firm niedostępne są np. manewry wyprzedzania czy omijania.

Technologiami, które się przenikają (co nie znaczy, że są tożsame) z technologiami pojazdów autonomicznych, są CAD (*Connected and Automated Driving*) i Automotive Internetworking. W dużym skrócie – dotyczą one zagadnień komunikacji między pojazdami (V2V), między

pojazdami a infrastrukturą (V2I). Szczególnym przypadkiem komunikacji V2V jest *platooning*, polegający na szeregowym połączeniu (niemechanicznym) pojazdów w skład (analogicznie do pociągu). Tylko pierwszy pojazd ma kierowcę, pozostałe podążają za nim. Przedmiotem niniejszej książki nie są jednak problemy dotyczące *automotive internet working*, jakkolwiek jeden z rozdziałów traktuje o tym zagadnieniu.

Pojazdy autonomiczne wymagają sensorycznych systemów pomiarowych, które pozwalają na identyfikację obiektów i ich cech w sąsiedztwie pojazdu. Podstawowe wykorzystywane układy sensoryczne to:

- DGPS (*Differential Global Positioning System*) – technika pomiarów GPS pozwalająca na uzyskanie większej dokładności niż przy standardowym pomiarze jednym odbiornikiem, polegająca na wykorzystaniu stacji bazowej (tzw. referencyjnej) – odbiornika ustawionego w dokładnie wyznaczonym punkcie (np. przez pomiar geodezyjny), który wyznacza na bieżąco poprawki różnicowe dla poszczególnych satelitów;
- lidary;
- radary;
- kamery.

Urządzeniem szczególnie wykorzystywanym w pojazdach autonomicznych jest lidar – skaner laserowy. Zostanie on opisany w kolejnych rozdziałach.



Rys. 3. Możliwe sytuacje drogowe

Jednym z najważniejszych elementów pojazdów autonomicznych jest system informatyczny, na który składają się *software* i *hardware* oraz nowe struktury algorytmiczne. Algorytmy stosowane w pojazdach autonomicznych opisane zostały między innymi w [Bugala 2018] oraz [Rosenzweig i Bartl 2019]. Działanie większości z nich opiera się na metodach heurystycznych wykorzystujących maszynowe uczenie (*deep learning*). Ta technologia informatyczna składa się zazwyczaj z trzech podstawowych filarów: dużych zbiorów danych (*big data*), bardzo dużych mocy obliczeniowych (procesorów GPU, charakteryzujących się przetwarzaniem równoległym) oraz algorytmów opartych na głębokich sztucznych sieciach neuronowych (choć nie tylko). Część informatyczna odpowiedzialna jest między innymi za rozpoznanie otoczenia pojazdu (np. samochodów, pieszych), identyfikację ich istotnych cech (np. prędkości), wreszcie zaproponowanie i zrealizowanie właściwego manewru. Ten element jest niezwykle trudny i stanowi jedno z największych wyzwań nie tylko w informatyce samochodowej, lecz także w informatyce w ogóle. Liczba możliwych sytuacji drogowych jest praktycznie nieskończona, trudno więc „nauczyć” sztuczny mózg właściwego zachowania we wszystkich przypadkach.

Niektóre sytuacje przedstawiono na rys. 3. Konstrukcja pojazdu na poziomie L5 do autonomicznej jazdy w każdych warunkach jest obecnie niemożliwa i zasadne jest pytanie, czy będzie możliwa kiedykolwiek. Dlatego należy przychylić się do tezy, że pojazdy autonomiczne powstaną w technologiach

wykorzystujących ściśle współpracę ze specjalnie „uzbrojoną” infrastrukturą. Do dziś nie zostały opracowane standardy dotyczące pojazdów autonomicznych. Trwają intensywne prace w Komisji Europejskiej i w Polsce. W kraju wprowadzeniem pojazdów autonomicznych i budową dla nich odpowiedniej infrastruktury zajmuje się Ministerstwo Infrastruktury.

Osobną kwestią jest problematyka prawna związana z pojazdami autonomicznymi. Dotyczy ona między innymi:

- 1) warunków dopuszczenia do ruchu pojazdów autonomicznych na różnym poziomie autonomizacji;
- 2) odpowiedzialności za ewentualne kolizje drogowe;
- 3) określania testów i miar bezpieczeństwa pojazdów autonomicznych;
- 4) określenia zasad budowy oprogramowania (np. oprogramowanie powinno być uruchamiane przez dwie niezależne funkcje);
- 5) zasad budowy elementów infrastruktury (np. przestrzennych map cyfrowych i ich udostępniania).

Rozważania dotyczące tych problemów zostaną podjęte w dalszych rozdziałach. W tym miejscu ograniczymy się tylko do stwierdzenia, że wprowadzona 11 stycznia 2018 r. ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych (Dz.U. 2018, poz. 317) dopuszcza testowanie pojazdów autonomicznych w Polsce. Mówiąc o pojazdach autonomicznych, bardzo często skupiamy się tylko na problemach sztucznej inteligencji, zapominając, że o właściwościach pojazdów autonomicznych decyduje również tradycyjna część mechaniczna (układy jezdne, zjawiska w obszarze kontaktu

koło ogumione – droga). Jeżeli nie będzie warunków ruchu powodujących bezpieczną jazdę samochodu „tradycyjnego”, układy autonomiczne też tego nie zapewnią. Pojazdy autonomiczne wymuszają niejako zmiany również w układach mechanicznych, uważanych za klasyczne. Jako przykład można wymienić pracę nad inteligentną oponą sferyczną firmy Goodyear (specjalnie dla pojazdów autonomicznych) czy konieczność stosowania układów *steer by wire* (co oznacza, że między układem kierowniczym a układem skrętu kół nie ma połączenia mechanicznego).

Literatura

- BUGAŁA M.: *Algorytmy stosowane w pojazdach autonomicznych*. „Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe” 4(50)/2018.
- ROSENZWEIG J., BARTL M.: *Review and Analysis of Literature on Autonomous Driving* (2019), <http://www.michaelbartl.com/article/a-review-and-analysis-of-literature-on-autonomous-driving/>.

Fragment pochodzi z książki:

Pojazdy autonomiczne i systemy transportu autonomicznego,
W. Choromański, I. Grabarek, M. Kozłowski,
M. Czerepicky, K. Marczuk,
Wydawnictwo Naukowe PWN,
Warszawa 2020

Wybrane systemy transportu autonomicznego. Systemy PRT. Systemy torowe i ich ewolucja

Włodzimierz Choromański, Iwona Grabarek, Maciej Kozłowski, Andrzej Czerepicki, Katarzyna Anna Marczuk

Trudno dzisiaj jednoznacznie powiedzieć, kto był prekursorem pojazdu autonomicznego. Niewątpliwie idea pojazdu poruszającego się samodzielnie od dawna nurtowała inżynierów, specjalistów transportu, a jej początki sięgają jeszcze czasów przed II wojną światową. W roku 1926 amerykańska firma Chandler Motor Car eksperymentowała z samochodem sterowanym pośrednio przez kierowcę siedzącego w podążającym za pojazdem samochodzie. Konstrukcją bliższą współczesnemu rozumieniu pojazdów autonomicznych było rozwiązanie opracowane w 1956 roku przez firmę General Motors. Model FireBird II poruszał się wzdłuż przewodu elektrycznego znajdującego się w podłożu drogi. W 1995 roku eksperymentalny pojazd VaMP przejechał ponad 1000 m bez pomocy człowieka i był to prawdopodobnie pierwszy samochód autonomiczny mogący poruszać się po określonym obszarze. Opracowany został przez zespół Mercedesa (we współpracy z Uniwersytetem Bundeswehry) w ramach projektu Eureka-Prometeusz. Pojazd wprawdzie miał potencjalną możliwość jazdy po autostradzie, ale każdy manewr musiał być potwierdzany przez jadącego w nim kierowcę.

Inne podejście do autonomizacji transportu zaproponował w 1956 roku amerykański planista Don Fitcher. Uważa się go za twórcę systemu PRT (*Personal Rapid Transit*). System ten wprawdzie w fazie początkowej wykorzystywał tor (bardzo specyficzny), ale spełniał warunki pojazdu autonomicznego. Obecnie samochody autonomiczne (przede wszystkim na poziomie L4) upodabniają się do współczesnych rozwiązań PRT. Często nawet firmy produkujące pojazdy PRT produkują jednocześnie pojazdy autonomiczne (głównie minibusy). Zasadne jest więc omówienie systemu PRT i współczesnych trendów jego rozwoju.

1. Klasyczne systemy PRT

Przez pojęcie systemu PRT rozumiemy system transportu, który składa się z 3–4-osobowych pojazdów poruszających się po lekkiej infrastrukturze nadziemnej (około 5 m nad powierzchnią ziemi) lub naziemnej – najczęściej po wydzielonym pasie ruchu. Charakterystyczną cechą systemu jest realizacja transportu *point to point* lub *door to door* (z punktu do punktu lub od drzwi do drzwi). Oznacza to, że między przystankiem początkowym a końcowym nie ma żadnych przystanków pośrednich. Pomiędzy miejscem początkowym a docelowym sieć połączeń ma charakter redundantny, co znaczy, że w zależności od aktualnej sytuacji drogowej (kongestie, awarie sieci itp.) pojazd wybiera trasę najbardziej optymalną. Systemy PRT łączą cechy transportu indywidualnego i zbiorowego. Zapewniają znaczny komfort podróży oraz, przy odpowiedniej organizacji, transport na żądanie (*on demand*).



Rys. 1. Fragment sieci PRT zaprojektowany dla Warszawy

Źródło: Opracowanie własne wykonane w ramach projektu „ECO-Mobilność” – kierownik W. Choromański

Na rys. 1 pokazano fragment sieci PRT zaprojektowany w ramach realizacji projektu „ECO-Mobilność” 2009–2016 (Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka – kierownik W. Choromański).

Należy podkreślić istotną różnicę między systemami PRT a systemami APM (*Automated People Mover*). W drugim przypadku mamy do czynienia z pojazdami torowymi o znacząco większej pojemności, poruszającymi się po ściśle określonej trasie, bez możliwości realizacji transportu *point to point*. Systemy APM dotychczas najczęściej możemy spotkać w transporcie lotniskowym (realizowane są w ten sposób np. połączenia między terminalami). Jednym z przykładów takiego transportu jest Sky Train firmy Bombardier, wykorzystywany na lotnisku w Phoenix w Arizonie (rys. 2).

Jak już wspomniano, Personal Rapid Transit jest relatywnie nowym systemem transportu miejskiego. Napęd pojazdów jest elektryczny (jak dotąd). Komisja Europejska postrzega PRT jako potencjalne nowe rozwiązanie dla systemów transportowych w miastach, jakkolwiek sama idea PRT sięga lat 50. XX wieku (narodziła się w USA).

Jedną z pierwszych pozycji literatury ujmującą kompleksowo zagadnienia transportu PRT jest praca Irvinga i in. z 1978 roku. Ukazała się ona przeszło 20 lat po pierwszych



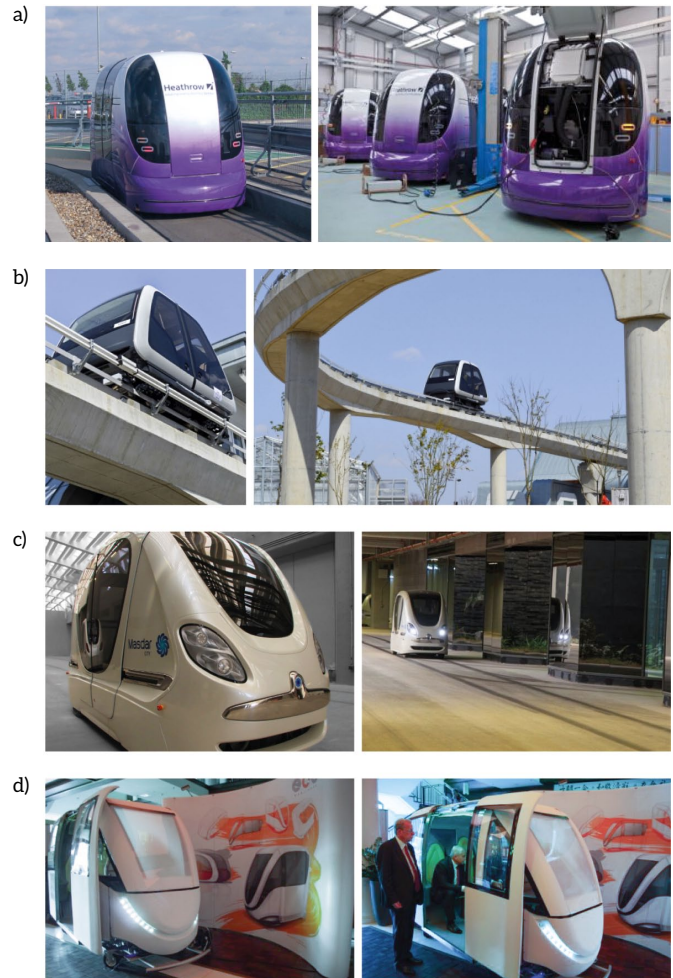
Rys. 2. APM Sky Train firmy Bombardier na lotnisku w Phoenix

pracach wspomnianego już Dona Fichtera – nowojorskiego planisty, którego uważa się za twórcę koncepcji PRT. Literatura dotycząca PRT jest relatywnie uboga. Przeważają prace o charakterze popularnonaukowym, a stosunkowo mało prac ma charakter teoretyczny lub naukowy. W polskiej literaturze warto zwrócić uwagę na prace autora tego rozdziału (Choromański i Kowara 2012; Choromański i in. 2013 a; Choromański i in. 2013 b; Choromański i in. 2013 c; Choromański i Kowara 2011 a; Choromański i Kowara 2011 b; Choromański i in. 2012; Choromański 2007; Choromański i Kowara 2013 e; Kozłowski i Choromański 2013 a; Kozłowski i Choromański 2013 b; Grabarek i Choromański 2014) – poruszające wiele aspektów technicznych systemu PRT, w tym także na dwutomową monografię *Ekomobilność* (Choromański i in. 2015).

Z pozycji zagranicznych na uwagę zasługują publikacje J.E. Andersona (Anderson 2007 i 2011) oraz I. Andreassona (Andreasson 2000 i 2001). Należy przy tym zauważyć, że autorzy są zwolennikami systemów PRT (przede wszystkim tzw. *High Capacity PRT*) i w ich pracach znajdujemy wiele stwierdzeń nie zawsze starannie potwierdzonych analizą teoretyczną. W wielu pozycjach literatury znajdziemy uzasadnienia zastosowań systemów PRT, jednak analizy te są dokonywane na poziomie bardzo ogólnym i rzadko udokumentowane badaniami symulacyjnymi (Andreasson 2000; Andreasson 2001; ATRA 2003). Na szczególną uwagę zasługują pozycje Lowsona (2009) oraz Gustafssona (2009). Autorzy dzielą się w nich doświadczeniami wynikającymi z wdrożenia nielicznych systemów PRT, którymi są: amerykański system w Morgantown, brytyjska ULTRA oraz brytyjsko-szwedzko-koreański Vectus lub PRT firmy 2getthere (rys. 3).

Morgantown nie jest typowym przykładem systemu PRT z powodu większej liczby pasażerów pojedynczego pojazdu (20 osób), która kwalifikuje go raczej do transportu grupowego (*Group Rapid Transit*, GRT), ale często jest wymieniany w literaturze jako wczesny pierwowzór systemów PRT. Projekt ten był zrealizowany w 100% ze środków federalnych USA. Jednak nigdzie więcej go nie zastosowano z powodu dużej szerokości toru oraz związanej z tym masywnej i drogiej w wykonaniu konstrukcji nośnej. Ponadto system ten jest drogi w eksploatacji z powodu energochłonnej instalacji topienia lodu i śniegu zalegających w czasie zimy na odkrytej powierzchni jezdni. System obsługuje trasę zawierającą pięć przystanków i jest sterowany całkowicie automatycznie. W dzień funkcjonuje, łącząc dwa końcowe przystanki, natomiast wieczorem zatrzymuje się również na pośrednich stacjach bocznicowych. Nie jest to więc klasyczny system PRT.

Następnym systemem jest brytyjska ULTRA (rys. 3), wdrożona do połączenia parkingu z terminalem 5 lotniska Heathrow w Londynie. Trasa liczy 3,8 km i łączy trzy przystanki. Nie jest to więc rozbudowana sieć PRT. Projekt został wdrożony przez firmę BAA (*British Airport Association*), która w 2005 roku podpisała umowę z właścicielem projektu – firmą ATS. Konstrukcja systemu jest prosta i tania. Bazuje ona na zasilanych z akumulatorów 4-osobowych pojazdach poruszających się po płaskich betonowych jezdniach usytuowanych na poziomie gruntu lub na słupach nośnych na wysokości kilku metrów, jeżeli wymaga tego konfiguracja terenu. Bezzałogowe



Rys. 3. System Ultra zainstalowany na lotnisku Heathrow (a); system Vectus (b); system firmy 2getthere (c); polski system PRT zbudowany na Politechnice Warszawskiej w ramach realizacji projektu „ECO-Mobilność” (d)

pojazdy o lekkiej konstrukcji są napędzane tradycyjnymi silnikami elektrycznymi, a do ich automatycznego sterowania oraz zmiany kierunku poruszania się na rozjazdach wykorzystuje się czujniki magnetyczne rozmieszczone wzdłuż trasy. Warto wspomnieć, że twórcą systemu PRT był Brytyjczyk, profesor Martin Lowson. Prototyp systemu tworzony był na uniwersytecie w Bristolu, ze znaczącym udziałem studentów.

Systemy pokazane na rys. 3 zostały wykonane w bardzo różnych technologiach. Dotyczy to zarówno systemów mechanicznych i układów jezdnych (koła stalowe poruszające się po szynach, koła ogumione), jak i układów napędowych (elektryczne silniki obrotowe lub liniowe), układów rekuperacji energii, wreszcie – układów sterowania. W zasadzie poza systemem opracowanym w Politechnice Warszawskiej (niestety niewdrożonym) żaden układ nie realizuje wszystkich typowych cech systemów PRT, w tym przede wszystkim nie ma cech transportu *point to point*. Wstępne badania systemu PRT wskazują, że na aktualnym poziomie techniki system ten nie zastąpi miejskiego transportu masowego (metro, monorail). Czy w ogóle idea *high capacity* PRT jest realistyczna, trudno dzisiaj powiedzieć. Na razie zastosowanie systemu PRT upatruje się jako transportu

uzupełniającego o charakterze lokalnym, np. z nowych dzielnic do dużego huba transportowego, np. stacji metra.

2. Problemy symulacji i algorytmy sterowania systemu PRT

Zanim przejdziemy do problemów symulacji i sterowania pojazdami PRT, przedstawimy elementy struktury rzeczywistego systemu PRT i jego modelu (tzw. modelu nominalnego). W tym podrozdziale opisano przyjęty nominalny model sieci PRT wraz ze wszystkimi jego komponentami. W prezentowanym podejściu sieć PRT składa się z następujących elementów:

- pojazdów PRT;
- przystanków;
- zajezdni;
- szlaków komunikacyjnych;
- skrzyżowań (zjazd i rozjazd);
- potoków pasażerów.

W modelu przyjmujemy, że wszystkie szlaki komunikacyjne są jednokierunkowe (tzn. nie jest możliwa kolizja pojazdów jadących w przeciwnym kierunku). Szlaki komunikacyjne są odcinkami łączącymi stacje, garaże oraz skrzyżowania. Poruszają się po nich pojazdy PRT zgodnie z zasadami ruchu i ograniczeniami występującymi na poszczególnych szlakach komunikacyjnych. Schemat modelu nominalnego wraz z wyróżnionymi elementami sieci PRT przedstawiono na rys. 4.

Dalszym uszczegółowieniem modelu nominalnego jest zdefiniowanie jego parametrów oraz ich identyfikacja.

Pojazd PRT

Pojazdy poruszające się w sieci PRT charakteryzują następujące właściwości:

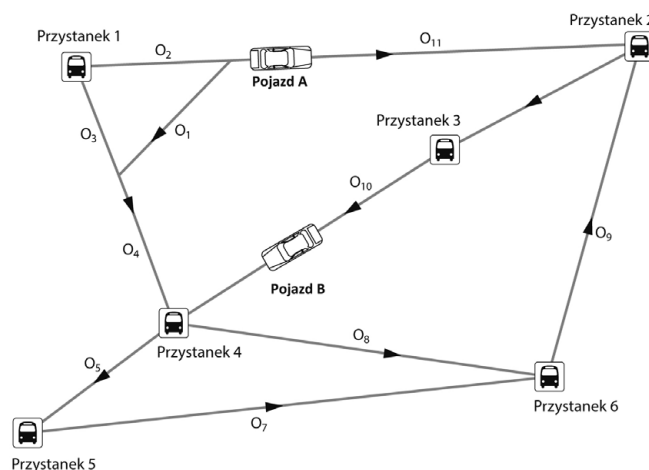
- liczba miejsc dla pasażerów (zwykle 4 lub 5);
- priorytet (niektóre pojazdy mogą być wyróżnione i uprzywilejowane);
- osiągi (w tym między innymi przyspieszenie, opóźnienie oraz maksymalna prędkość);
- parametr eksploatacyjny – wypełnienie pojazdu, tzn. ilu pasażerów ma pojazd; ten parametr jest wygodnie przyjąć jako dyskretną zmienną losową o zadanym rozkładzie;
- parametr eksploatacyjny – dopuszczalna prędkość.

Szlak komunikacyjny

Szlaki komunikacyjne reprezentują elementy systemu torowego, po którym poruszają się pojazdy PRT. Podstawową jednostką szlaków komunikacyjnych jest segment Q_i (rys. 4). Jest to fragment toru łączący bezpośrednio dwa wydzielone punkty sieci – stacje, skrzyżowania lub zajezdni. Każdy segment charakteryzują następujące parametry:

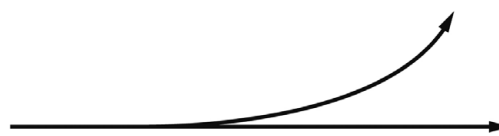
- długość;
- maksymalna dozwolona prędkość, z którą może poruszać się po nim pojazd;
- kierunek poruszania się pojazdów;
- priorytet (reprezentuje kategorię szlaku komunikacyjnego, np. magistrała główna, segment dojazdowy itp.).

Zbiór szlaków komunikacyjnych oznaczmy literą Q . W istocie mamy do czynienia z wektorem $Q = [Q_i]_{i=1, N}$ liczba szlaków komunikacyjnych zawarta w sieci.

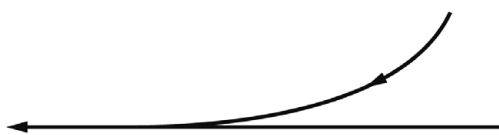


Rys. 4. Model nominalny sieci PRT

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Rozjazd szlaku komunikacyjnego



Rys. 6. Zjazd szlaków komunikacyjnych

Skrzyżowania

W miejscach przecięcia się szlaków komunikacyjnych znajdują się skrzyżowania. Wyróżniamy dwa rodzaje skrzyżowań – rozjazdy i zjazdy, które przedstawiono na rys. 5 i 6.

Każde skrzyżowanie, a zwłaszcza skrzyżowanie kolizyjne typu zjazd, jest koordynowane przez moduł zarządzania ruchem, decydujący o uszeregowaniu pojazdów PRT według reguł pierwszeństwa przejazdu.

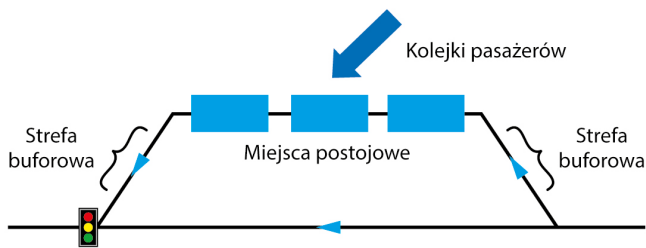
Przystanek

Przystanki, będące ważnymi elementami sieci PRT, są miejscami, w którym pasażerowie zamawiają pojazdy oraz na nie czekają, wsiadają i wysiadają. W systemie rozróżniamy dwa rodzaje przystanków: bez zatok (FIFO) oraz z zatokami. Na przystanku bez zatok (rys. 7) obowiązują zasady kolejki FIFO – pojazd, który wjechał pierwszy na przystanek, opuszcza go również jako pierwszy.

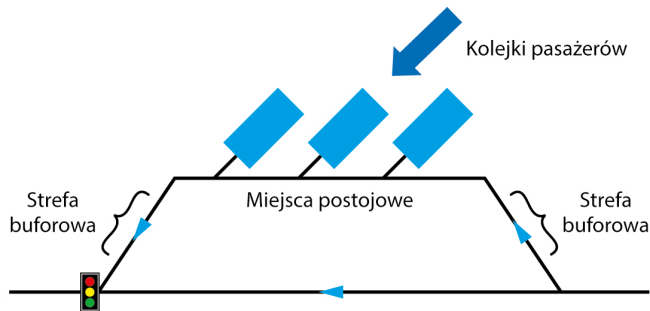
Drugim rozważanym przystankiem jest przystanek z zatokami (rys. 8), który pojazdy PRT mogą opuszczać niezależnie.

W sieci PRT przystanki charakteryzują następujące parametry:

- rodzaj (bez zatok lub z zatokami);
- liczba miejsc postojowych;
- długość buforów (przed i po miejscach postojowych).



Rys. 7. Przystanek bez zatok (FIFO)



Rys. 8. Przystanek z zatokami

Zajezdnia

Zajezdnia jest miejscem, z którego pojazdy rozpoczynają ruch i do którego wracają w celu obsługiwanego lub garażowania. Podstawowym parametrem charakteryzującym zajezdnię jest liczba miejsc postojowych.

Model symulacyjny

Model symulacyjny systemu PRT jest implementacją modelu nominalnego omówionego poprzednio wraz z regułami ruchu. Główne reguły wymieniono poniżej.

1. Między pojazdami musi być zachowana właściwa separacja. W przypadku sytuacji wymagającej nagłego hamowania nie dopuszcza ona do kolizji sąsiadujących ze sobą pojazdów. Separacja jest funkcją prędkości i maleje ze zmniejszaniem prędkości, np. w strefie buforowej przystanków spada do około 0,5 m.
2. Przy zachowaniu odpowiedniej separacji pojazd dąży do osiągnięcia maksymalnej prędkości dopuszczalnej na danym szlaku.
3. Pojazd stara się zachować płynność jazdy, to znaczy zredukować nadmierne przyspieszenia i opóźnienia.
4. Pojazd stara się zredukować zużycie energii.
5. Na skrzyżowaniach obowiązuje pierwszeństwo dla pojazdu bardziej uprzywilejowanego.

Głównym celem symulatora sieci PRT jest możliwość badania przepustowości oraz wydajności dowolnego systemu PRT. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można dokonać optymalizacji algorytmów sterowania ruchem pojazdów. Proponowany model umożliwi przeprowadzenie eksperymentów umożliwiających analizę zdolności wykonania zadania transportowego, czyli określenie, w jakim czasie pojazdy w sieci są w stanie przewieźć pasażerów do celu ich podróży. Analizie

mogą zostać poddane różne warianty obciążenia sieci, np. w godzinach szczytu, porannych, nocnych. Dodatkowo model umożliwi przetestowanie algorytmów zarządzania pojazdami, wybór i modyfikację tras podróży, zarządzanie ruchem pojazdów pustych itp.

Symulator ruchu pojazdów PRT posługuje się modelem złożonego automatu komórkowego. Automaty komórkowe są to struktury opisane przez siatkę komórek oraz ich stany, przejścia i reguły tych przejść. Każdy prosty automat komórkowy składa się z n -wymiarowej regularnej, dyskretnej siatki komórek, w której wszystkie komórki są takie same, a cała przestrzeń siatki musi być zajmowana przez komórki ułożone obok siebie. Każda z komórek ma jeden stan należący do skończonego zbioru stanów. Ewolucja każdej komórki przebiega według tych samych, ściśle określonych reguł lokalnych, które zależą wyłącznie od poprzedniego stanu komórki oraz od stanów skończonej liczby komórek – sąsiadów. Ewolucja następuje w dyskretnych przedziałach czasowych jednocześnie dla każdej komórki. W automacie komórkowym komórka jest automatem skończonym.

W celu symulowania ruchu PRT zaproponowano adaptację automatów komórkowych do bardziej złożonej struktury, którą jest graf skierowany reprezentujący infrastrukturę sieci PRT.

Jedna komórka odpowiada zadanej jednostce drogi i jest parametrem modelu (wszystkie pozostałe parametry, w tym prędkość, są reprezentowane w odniesieniu do tej jednostki). Każdy pojazd w modelu porusza się z prędkością całkowitą zawartą w przedziale od 0 do V_{max} .

W symulatorze sieci PRT zaimplementowano model układu topologicznego składający się z 2-wymiarowej regularnej, dyskretnej siatki komórek, stanowiącej warstwę abstrakcji nad grafem skierowanym. W grafie tym węzły są elementami sieci PRT (przystanki, skrzyżowania), natomiast krawędzie określają kierunek przemieszczania się między węzłami. Każdy węzeł odpowiada jednej komórce w 2-wymiarowej siatce.

Parametrem modelu jest konfiguracja opisująca między innymi infrastrukturę sieci pojazdów PRT wraz z informacjami o początkowym położeniu pojazdów, ich parametrach, lokalizacji przystanków i garaży oraz potoku pasażerów (skąd, dokąd, kiedy i ilu pasażerów chce podróżować). Dla każdego pojazdu symulator posługuje się algorytmem wyznaczania optymalnej trasy dojazdu do ustalonego celu. Zaimplementowany model stanowi szkielet symulacji rzeczywistego ruchu pojazdów PRT. Przyjęte rozwiązanie umożliwia dynamiczne sterowanie pojazdami podczas jazdy.

2.1. Realizacja modelu

W symulatorze ruchu PRT infrastruktura sieci jest reprezentowana jako graf skierowany

$$G = (V, E) \quad (1)$$

gdzie:

$V = \{v_i; i \in I\}$ – zbiór wierzchołków, $v_i \in \{\text{PRZYSTANEK}_{szeregowy}, \text{PRZYSTANEK}_{zatokowy}, \text{ZAJEZDNIA}, \text{SEKTOR}\}$;

$E = \{e_j; j \in J\}$ – zbiór skierowanych krawędzi, $e_j = (v, w)$ dla $v, w \in V$.

Zbiory I oraz J są ustalonymi zbiorami indeksów odpowiednio dla wierzchołków i krawędzi.

Graf G , reprezentujący statyczne właściwości sieci PRT, został wzbogacony o funkcję stanu, w sposób dyskretny opisującą stan sieci PRT w czasie, tj. lokalizację poszczególnych pojazdów PRT oraz ich dynamiczne właściwości.

Każdy wierzchołek może znajdować się w jednym z dwóch stanów:

- zajęty – gdy w danym miejscu znajduje się pojazd PRT;
- wolny – w przeciwnym przypadku.

2.1.1. Opis reguł ruchu

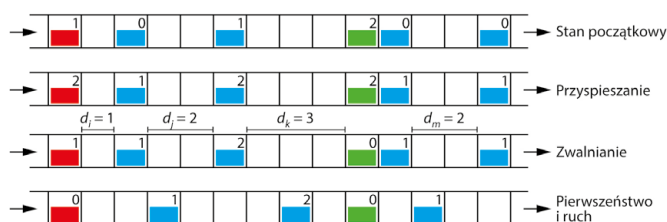
W chwili ustalenia struktury grafu odzwierciedlającego topologię sieci PRT elementy dynamiczne (tj. pojazdy, zajezdnie, skrzyżowania, moduły logiczne) otrzymują warunki początkowe (między innymi położenia, prędkości, wagi). Po ustaleniu i zdefiniowaniu wszystkich elementów składowych automatu komórkowego można przejść do opisu reguł określających ewolucję automatu w czasie.

Jak wspomniano, wszystkie komórki zmieniają stan synchronicznie, realizując pojedynczy „tik” (krok iteracji) upływu czasu. Realizację tiku można podzielić na kilka faz, które scharakteryzowano poniżej.

1. Sprawdzanie reguł przejść – w tej fazie jest sprawdzany aktualny stan komórki oraz stany komórek sąsiednich.
2. Sprawdzanie sąsiedztwa – w tej fazie bada się, czy jedna z komórek sąsiednich nie wchodzi w stan, w którym wykonanie kolejnego kroku iteracji jest niezgodne z założonymi zasadami ewolucji automatu (np. jeden pojazd najedzie na drugi). Takie stany będziemy nazywali konfliktami. Należy wyeliminować wszystkie istniejące konflikty według ustalonych wcześniej reguł (np. przez redukcję prędkości).
3. Sprawdzanie warunków brzegowych – sprawdzane są komórki znajdujące się na krawędziach automatu komórkowego (np. gdy pojazd wjeżdża do zajezdni). Należy je usunąć z automatu (pojazdy przebywające w zajezdni nie biorą udziału w ewolucji automatu do chwili, w której z niej wyjadą).
4. Sprawdzanie liczby iteracji – jeśli jest to automat o skończonym, z góry określonym cyklu życiowym, w tej fazie sprawdza się, czy może nastąpić koniec ewolucji automatu.

Aktualizacja konfiguracji modelu w ramach taktu (automat komórkowy realizuje zmiany stanów synchronicznie) składa się z faz wykonywanych równoległe dla wszystkich pojazdów w sieci (rys. 9), które opisano poniżej.

1. Przyspieszanie – gdy prędkość pojazdu v jest mniejsza od prędkości maksymalnej (ustalonej dla pojazdu bądź na odcinku drogi) oraz dystans do kolejnego pojazdu jest większy niż $v + 1$ komórek, wówczas zwiększ prędkość o jedną jednostkę, czyli wykonaj $v = v + 1$ (drugi wiersz na rys. 9 – ograniczeniem prędkości jest 2, pojazd czerwony zmienił prędkość z 1 na 2).
2. Zwalnianie – jeśli dwa pojazdy poruszają się odcinkiem drogi jeden za drugim w odległości j komórek, upewnij się, czy prędkość pojazdu jadącego z tyłu wynosi co najwyżej j ; jeśli ten warunek nie jest spełniony, zredukuj prędkość do $j - 1$, czyli wykonaj $v = j - 1$ (trzeci wiersz na rys. 9 – pojazd



Rys. 9. Ewolucja automatu komórkowego w czasie

zielony zmniejszył prędkość z 2 do 0, ponieważ przed nim stoi inny pojazd).

3. Randomizacja prędkości (faza opcjonalna) – z prawdopodobieństwem p_1 prędkość pojazdu jest zmniejszana o 1 (jeżeli jest ona większa od 0), czyli $v = v - 1$.
4. Randomizacja awarii (faza opcjonalna) – z prawdopodobieństwem p_2 pojazd ulega awarii na ustalonej liczbie jednostek czasu (wtedy prędkość pojazdu jest ustawiana na 0 przez ten okres).
5. Pierwszeństwo i ruch – jeśli w następnym kroku iteracji (jednostce czasu) pojazd przejeżdża przez skrzyżowanie, sprawdź następujące warunki:
 - gdy nie ma konfliktu na skrzyżowaniu, tzn. inny pojazd z innego kierunku nie będzie w tym samym czasie przejeżdżał przez skrzyżowanie, nie rób nic;
 - w przeciwnym razie ustal kolejność przejazdu pojazdów (za szeregowanie jest odpowiedzialny moduł logiki omawiany w następnym punkcie); pojazd z pierwszeństwem przejazdu przejeżdża normalnie, natomiast pojazdy, które muszą ustąpić, zwalniają i czekają przed skrzyżowaniem;
 - ruch: przenieś pojazdy o v komórek w kierunku jazdy (ostatni wiersz na rys. 9 – pojazd czerwony prawdopodobnie stoi przed skrzyżowaniem, które jest zajęte, ponieważ jego prędkość została zmniejszona do 0; pojazd zielony nadal stoi, a pozostałe pojazdy – niebieskie – zostały przesunięte odpowiednio do przodu).

2.1.2. Opis reguł zarządzania ruchem i sterowania

Głównym zadaniem symulatora jest możliwość dokonania analizy różnych algorytmów sterowania pojazdem pod kątem optymalizacji przepustowości sieci, czyli liczby pasażerów przewiezionych do miejsca docelowego w ustalonym okresie. W przyjętym rozwiązaniu logikę modelu podzielono na następujące moduły:

- moduł wyznaczania trasy przejazdu;
- moduł sterowania wolnymi pojazdami;
- moduł szeregowania pojazdów na skrzyżowaniu;
- moduł przydzielania pojazdu do realizacji zlecenia.

W pierwszej warstwie procesu sterowania ruchem w sieci PRT można wyróżnić dwa najważniejsze algorytmy, które odpowiadają za skuteczne symulowanie ruchu:

- algorytm sterowania ruchem pojedynczego pojazdu;
- algorytm wyboru najkrótszej drogi (a właściwie drogi, która zapewnia najkrótszy czas podróży).

Jednym z podstawowych założeń symulatora systemu PRT jest fakt, że symulacja odbywa się w czasie dyskretnym. Oznacza

to, że stan wszystkich obiektów w systemie jest odświeżany co jednostkę czasu (takt).

Drugim ważnym elementem jest algorytm wyboru najkrótszej drogi. Jest on wykonywany za każdym razem, gdy pojazd wyrusza w drogę (przewozi pasażerów z punktu A do punktu B, pusty wagon wraca z garażu do stacji itp.). Należy zauważyć, że trasa może zostać zaktualizowana w dowolnej chwili (wskutek zmieniającej się sytuacji w sieci).

Proponowany algorytm jest wersją algorytmu wyszukiwania najkrótszej drogi metodą Dijkstry. Ponieważ klasyczny algorytm Dijkstry jest bardzo ogólny i przyjmuje wiele założeń, zaimplementowany w systemie symulacji sterowania ruchem sieci PRT algorytm rozbudowano o dodatkowe sprawdzenia i uwarunkowania. Poszczególne moduły odpowiedzialne za zarządzanie ruchem oraz sterowanie opisano poniżej.

2.1.3. Moduł wyznaczania trasy przejazdu

W celu wyznaczenia ścieżki do punktu docelowego pojazd posługuje się algorytmem wyznaczania najtańszej ścieżki. Proponowany model wykorzystuje dynamiczny algorytm Dijkstry, bazujący na funkcji heurystycznej oceny kosztu przejazdu na elementarnym odcinku drogi. Funkcja ta uwzględnia między innymi następujące parametry:

- odległość;
- oczekiwany czas przejazdu z uwzględnieniem aktualnej sytuacji drogowej;
- ilość energii niezbędnej na przejechanie danego odcinka.

Przyjęty model pozwala na swobodny wybór parametrów (wag) funkcji kosztów. Każdy z modułów zaimplementowano w taki sposób, aby umożliwić parametryzację algorytmów i ich wag. Dzięki temu można przeprowadzać te same eksperymenty ze zmiennymi parametrami. Pozwala to określić optymalne konfiguracje sieci w zależności od typów zadań transportowych.

W przyjętym rozwiązaniu algorytm Dijkstry wykorzystuje następującą funkcję kosztu przejazdu na elementarnym odcinku drogi

$$w(e) = A d(e) + B v_{sr}(e) \quad (2)$$

gdzie:

$e \in E$ – krawędź w modelu;

A, B – wagi;

$d(e)$ – funkcja odległości;

$v_{sr}(e)$ – średnia prędkość na odcinku z ustalonego odcinka czasu (domyślnie przeliczana co 15 min).

Należy zauważyć, że gdy $A = 0$, moduł wybiera najszybszą trasę przejazdu, natomiast dla $B = 0$ moduł wybiera najkrótszą trasę w sensie odległości.

2.1.4. Moduł sterowania wolnymi pojazdami

W sieciach transportowych typu PRT kluczowe znaczenie ma zarządzanie wolnymi pojazdami. Pojazdy mają wiele możliwości – mogą np. udać się do garażu i oczekiwać na zlecenie wyjazdu po pasażera. Alternatywnym wariantem jest oczekiwanie na przystanku (na którym być może pojawi się wkrótce pasażer). Pojazd może przyjąć również strategię krążenia po sieci. Należy pamiętać, że każdy możliwy wariant jest związany

z kosztem, np. energii niezbędnej do przejazdu, blokowaniem stanowiska na przystanku, tworzeniem zbędnego ruchu w sieci. Przyjęty model umożliwia symulowanie różnych zachowań, co z kolei pozwala na dostosowanie ich strategii do konkretnego wdrożenia.

2.1.5. Moduł szeregowania pojazdów na skrzyżowaniu

W modelu komórkowym nie rozstrzygamy bezpośrednio o pierwszeństwie przejazdu. Wyróżniono moduł odpowiedzialny za szeregowanie pojazdów, które zbliżają się do skrzyżowania. Uszeregowanie jest zależne od priorytetu dróg, pojazdów, parametrów skrzyżowania. W szczególnym przypadku dopuszcza się rozpatrywanie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, na których deterministycznie rozstrzyga się pierwszeństwo. Wszystkie wagi wpływające na zachowanie na skrzyżowaniu są parametrami modelu i mogą zostać dopasowane do konkretnego zastosowania.

Dodatkowym zadaniem algorytmu jest maksymalizowanie prawdopodobieństwa, że jadąc w ustalonym kierunku, będziemy mieli pierwszeństwo na kolejnych skrzyżowaniach. Rozważaniom poddano mechanizm synchronizujący moduły szeregowania na podstawie informacji o natężeniu ruchu na danym szlaku komunikacyjnym.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na algorytm szeregowania jest regulowanie pierwszeństwa przejazdu na podstawie liczby pojazdów znajdujących się na danym szlaku komunikacyjnym. Aby umożliwić testowanie tego typu strategii, model rozszerzono o wagi, na które składają się następujące parametry:

- priorytet drogi, którą porusza się pojazd;
- czas oczekiwania na skrzyżowaniu;
- liczba przewożonych osób;
- priorytet celu, do którego jedzie pojazd.

Zmiana wag pozwala na wyznaczenie optymalnych wartości dla różnych topologii sieci oraz stanów wejściowych symulacji.

Odpowiednia konfiguracja modułu szeregowania może również odzwierciedlić strategię deterministyczną – ustępowanie pierwszeństwa pojazdowi znajdującemu się np. po prawej stronie. Aby nie dopuścić do sytuacji, w której pojazd czeka zbyt długo na skrzyżowaniu, ostateczna decyzja zostaje podjęta również na podstawie czasu oczekiwania.

2.1.6. Moduł przydzielania pojazdu do realizacji zlecenia

Jednym z najważniejszych modułów w opisywanym modelu jest część odpowiedzialna za wybór pojazdu, który ma obsłużyć konkretne zlecenie (gdy pasażer czeka na pojazd na przystanku). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, moduł jest konfigurowalny i uwzględniono dwie sytuacje: wybierany jest pojazd, który najszybciej dojedzie po pasażera, albo pojazd, który jest najbliżej.

2.2. Optymalizacja sieci PRT. Efektywność transportowa

Zdefiniujmy problem optymalizacji sieci PRT oraz zagadnienie analizy efektywności transportowej. Problem optymalizacji ruchu w sieci PRT może być sformułowany na dwa sposoby. Po pierwsze, dla zadanej struktury sieci (topologii sieci, liczby dostępnych pojazdów, rozmieszczenia potoków

itp.) zagadnienie polega na wyborze optymalnej trasy przejazdu pojazdu (problem był częściowo analizowany we wstępie), przy czym przez pojęcie optymalnej trasy rozumie się trasę minimalizującą funkcję celu, którą może być czas przejazdu pojazdu.

Drugi problem optymalizacji ruchu w sieci PRT polega na znalezieniu optymalnej konfiguracji wybranych elementów sieci, która maksymalizuje efektywność transportową całego systemu. Przez pojęcie zdolności transportowej sieci PRT rozumie się liczbę pasażerów obsłużonych podczas trwania badania, którzy nie oczekiwali na pojazd dłużej niż 300 s (5 min).

Na potrzeby badań czas podróży pojazdu $T_{podróży}$ został zdefiniowany jako suma teoretycznego czasu przejazdu $T_{referencyjny}$ oraz czasu opóźnienia $\Delta_{opóźnienia}$. Teoretyczny czas przejazdu $T_{referencyjny}$ to najkrótszy możliwy czas podróży pojazdu między dwoma przystankami (końcowym i początkowym), przy założeniu, że na trasie nie ma zatorów, a pojazd porusza się z maksymalną możliwą prędkością (uwzględniając maksymalną dopuszczalną prędkość na segmentach). W tym przypadku przyspieszanie i zwalnianie jest pomijane. Natomiast $\Delta_{opóźnienia}$ to czas oczekiwania na pojazd, opóźnienia spowodowane zatorami na trasie oraz czas potrzebny na przyspieszenie i wyhamowanie.

$$T_{podróży} = T_{referencyjny} + \Delta_{opóźnienia} \quad (3)$$

$$\Delta_{opóźnienia} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (4)$$

gdzie:

- t_1 – czas oczekiwania na pojazd;
- t_2 – czas wsiadania i wysiadania z pojazdu;
- t_3 – czas przejazdu związany z poruszaniem się z prędkością mniejszą niż dozwolona, wynikającą z zagęszczenia ruchu;
- t_4 – czas niezbędny na przyspieszanie i zwalnianie.

Tak zdefiniowana efektywność dobrze odzwierciedla potrzeby pasażerów oraz ma klarowną interpretację fizyczną.

Inną miarą efektywności jest tzw. współczynnik odchylenia czasu przejazdu δ , będący stosunkiem tzw. czasu opóźnienia do czasu referencyjnego

$$\delta = \frac{\Delta_{opóźnienia}}{T_{referencyjny}} \quad (5)$$

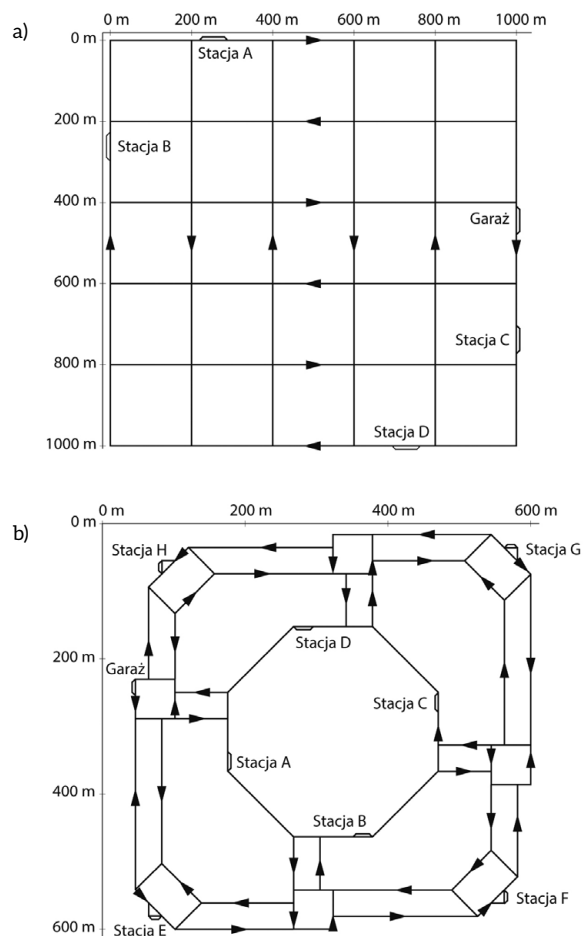
Należy dążyć do minimalizacji tego współczynnika.

Dwie zdefiniowane miary, czyli liczba obsłużonych w jednostce czasu pasażerów, których czas oczekiwania na pojazd nie był dłuższy niż określona jednostka czasu (np. 300 s), oraz współczynnik odchylenia czasu przejazdu, dobrze odzwierciedlają efektywność transportową sieci PRT.

2.3. Przykładowe wyniki symulacji

Przedmiotem analiz były struktury sieci, której schemat zaprezentowano na rys. 10. Publikowane były między innymi w pracach: Choromański i in. 2013 b, Choromański i in. 2013 d, Dyduch 2014.

Założono ciągły napływ pasażerów do wszystkich przystanków. Do wyznaczenia optymalnych dróg oraz sterowania ruchem zastosowano algorytmy opisane w poprzednich rozdziałach. Parametry przyjęte do symulacji przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Analizowane struktury sieci PRT1 (a) i PRT2 (b)

Założono, że nie wszystkie pojazdy są wypełnione całkowicie. Wypełnienie pojazdów zdefiniowano jako zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa przedstawionym w tabeli 2.

Symulację zrealizowano dla różnych wartości liczby pojazdów w sieci. Wyniki zilustrowano na rys. 11 i 12 oraz ujęto w tabelach 3 i 4. Dla obu rodzajów sieci można znaleźć optymalną liczbę pojazdów, maksymalizującą liczbę przewiezionych pasażerów zgodnie z przyjętymi wcześniej kryteriami. Współczynnik odchylenia czasu przejazdu stale rośnie, co jest niepokojące, lecz charakterystyczne dla sieci relatywnie nierozległych. Należy zaznaczyć, że przykładowych wyników symulacji nie można uogólniać na inne topologie sieci i odmienne potoki pasażerów. Wynika stąd istotny wniosek, że oceny sensowności zastosowania sieci PRT należy dokonywać indywidualnie dla każdego przypadku.

3. Rozwiązanie układu sterowania

Wprawdzie celem niniejszej książki nie jest szczegółowe pokazanie rozwiązania układu sterowania i zarządzania pojazdami PRT, przedstawimy tu jednak pewne rozważania i konkretne rozwiązanie dotyczące systemu PRT opracowanego na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. W. Choromańskiego. Problemy, które tu się pojawiają, są analogiczne do problemów związanych z automatyzacją pojazdów drogowych (samochodów): na ile pojazdy

Tabela 1. Parametry założone w symulacji

Parametr sieci	Wartość parametru dla sieci PRT1	Wartość parametru dla sieci PRT2
Całkowita długość torów	12 km	6 km
Kategoria segmentów torów K_i	K_A , segmenty magistralne	K_A , segmenty magistralne
Maksymalna dozwolona prędkość na segmentach V_{seg_i}	50 km/h	50 km/h
Liczba przystanków p	4	8
Typ przystanków	przystanki proste PP	przystanki proste PP
Liczba miejsc postojowych m_i na przystanku	5	4
Wielkość stref buforowych b_i	8 m	8 m
Liczba dostępnych pojazdów	50	50
Techniczna maksymalna prędkość pojazdów V_{pobj_i}	50 km/h	50 km/h
Maksymalne przyspieszenie pojazdów a_i	2 m/s ²	2 m/s ²
Czas wsiadania i wysiadania pasażerów γ	20 s	20 s
Czas postoju pojazdu na przystanku $t_{postoiu}$	10 min	10 min
Separacja między poruszającymi się pojazdami sep_i	dynamiczna, zależna od prędkości – od 0,5 m do 14 m	dynamiczna, zależna od prędkości – od 0,5 m do 14 m
Wagi cząstkowe	wszystkie wagi równe 1	wszystkie wagi równe 1
Algorytm wyboru najkrótszej drogi	algorytm Dijkstry	algorytm Dijkstry
Wielkość i rozkład potoków pasażerów	rozkład równomierny na wszystkie przystanki w liczbie 1300 os./h na przystanek (5200 os./h w systemie) pasażerowie z równym prawdopodobieństwem wybierają każdy z przystanków docelowych, pojawiają się na przystanku równomiernie w ciągu godziny	rozkład równomierny na wszystkie przystanki w liczbie 1300 os./h na przystanek (5200 os./h w systemie) pasażerowie z równym prawdopodobieństwem wybierają każdy z przystanków docelowych, pojawiają się na przystanku równomiernie w ciągu godziny
Akceptowalny czas oczekiwania pasażerów na pojazd ΔT	300 s (5 min)	300 s (5 min)

Tabela 2. Wypełnienie pojazdów

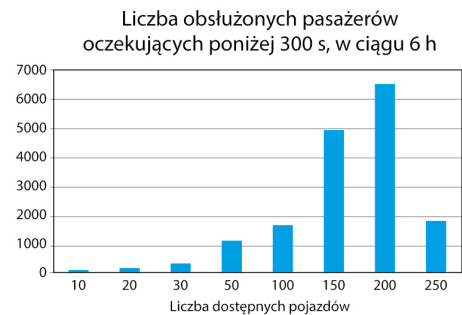
Liczba pasażerów w pojeździe	0	1	2	3	4
Prawdopodobieństwo	0	0	0,1	0,2	0,7

Tabela 3. Wyniki symulacji dla sieci PRT1

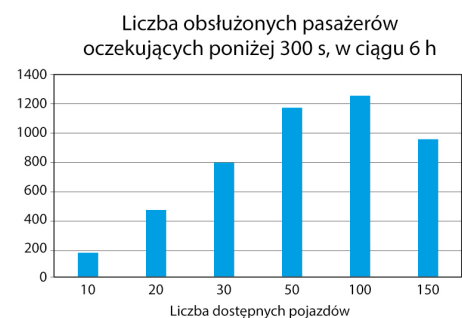
Liczba dostępnych pojazdów	Liczba obsłużonych pasażerów poniżej 300 s, w ciągu 6 h	Współczynnik odchylenia czasu przejazdu
10	83	0,26
20	172	0,34
30	332	0,41
50	1146	0,61
100	1682	3,23
150	4947	6,86
200	6522	7,95
250	1840	9,76

Tabela 4. Wyniki symulacji dla sieci PRT2

Liczba dostępnych pojazdów	Liczba obsłużonych pasażerów poniżej 300 s w ciągu 6 h	Współczynnik odchylenia czasu przejazdu
10	189	0,87
20	474	0,90
30	791	1,07
50	1168	2,23
100	1247	4,25
150	953	6,51



Rys. 11. Wykresy wyników symulacji dla sieci PRT1



Rys. 12. Wykresy wyników symulacji dla sieci PRT2

powinny korzystać z układów ulokowanych w sobie, a na ile z układów i informacji pochodzących z infrastruktury. Oba rozwiązania mają wady i zalety. W projekcie opracowanym na Wydziale Transportu PW połączono obydwa systemy, a ogólna struktura została przedstawiona na rys. 13.

System CSS ma informacje o wszystkich aktualnie eksploatowanych pojazdach (położenie, prędkość, docelowe miejsce podróży). Wyznacza on dla każdego pojazdu trasę podróży (modyfikuje ją w każdym węzle sieci PRT). System ten może również określać dopuszczalną aktualną prędkość ruchu. Prędkość tę określa również SP, a zatem są one liczone przez dwa niezależne oprogramowania. SP steruje również przełączaniem pokładowych zwrotnic pojazdu (tzw. *passive switch*), jakkolwiek sterowania dokonuje się na bazie informacji przekazywanych przez CSS. Systemy obszarowe stosowane są przy bardzo rozległych sieciach PRT – wtedy kontrolowana sieć dzielona jest na obszary.

4. Ewolucja systemów PRT

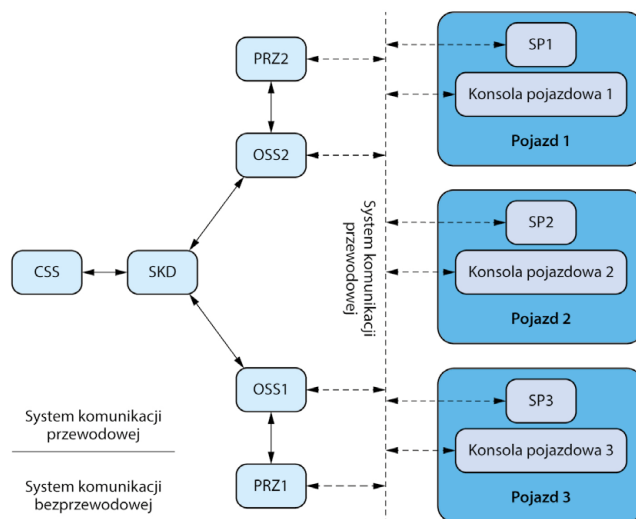
Ewolucja systemów PRT mierza w kilku kierunkach.

- Modyfikacji pojęcia toru prowadzącego pojazd. Tory definiują sieć PRT, która powinna być „gęsta” i redundantna. Tor nie powinien mieć charakteru mechanicznego, a winien być realizowany metodami informatycznymi i telekomunikacyjnymi (np. przy wykorzystaniu technologii SLAM, opisanej w dalszych rozdziałach).
- Pojazd nie powinien poruszać się tylko po wydzielonej dla siebie i tylko dla siebie drodze (w terminologii anglosaskiej to tzw. ROW, *a rights of way*). Powinien umożliwiać poruszanie się po kategoriach ROW A, B i C. Dla kategorii C pojazd PRT współużytkuje drogę z innymi pojazdami.
- System powinien być skalowalny, tzn. umożliwiać ruch po dedykowanej drodze umieszczonej nad powierzchnią ziemi (ROW A), ale również na powierzchni, gdzie współużytkuje drogę z innymi pojazdami.
- Pojazdy powinny być autonomiczne na poziomie L4.

Nie osiągnięto jeszcze takiego poziomu technologii, aby wdrożyć tego rodzaju systemy. Jakkolwiek wydaje się, że zostaną one wprowadzone w ciągu 3–4 lat, znacznie wcześniej niż samochody czy autobusy na poziomie L5.

4.1. Polska propozycja systemu

W Polsce zaproponowany został system HMASSUT Prometheus. Propozycja tego rozszerzenia została opracowana przez prof. W. Choromańskiego (Choromański i Garberek 2018; Choromański, Garberek, Kozłowski 2019; Choromański i Garberek 2020). System stanowi istotne rozszerzenie w stosunku do znanego w literaturze systemu PRT, integrując trzy technologie: PRT, pojazdu elektrycznego i pojazdu autonomicznego. System ten składa się z małych, czteroosobowych pojazdów elektrycznych poruszających się autonomicznie po lekkiej nadziemnej infrastrukturze (w trybie autonomicznym i torowym). Pojazdy realizują transport *point to point*, tzn. od przystanku początkowego do końcowego nie ma przystanków pośrednich. Pojazd sam wybiera optymalną trasę podróży. Pojazdy w tym samym trybie mogą się poruszać po drogach, które współużytkują z innymi pojazdami. W tym przypadku również zachowany



Rys. 13. Ogólna struktura sterowania systemem PRT: CSS – Centralny System Sterowania; OSS – Obszarowy System Sterowania; SP – pokładowy (pojazdowy) system sterowania; SKD – System Koncentratora Danych; PRZ 1, 2 – Przystankowe Systemy Sterowania

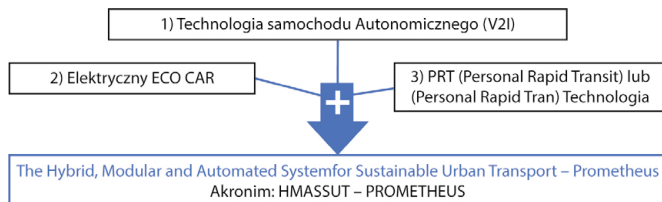
jest tryb autonomiczny (na poziomie L4 jest to tryb jazdy bez kierowcy – pojazd nie jest wyposażony w kierownicę). W tym przypadku pojazd wykorzystuje tor elektroniczny (sygnały elektromagnetyczne generowane z instalacji drogowej) lub (w dalszym rozwoju systemu) tor elektroniczny (tor wyznaczony przez pomiarowy samochód wykorzystujący pomiar radarowy, lidarowy i z kamer). W drugim przypadku system do kierowania pojazdem wykorzystuje technologię maszynowego głębokiego uczenia (z silnym uwzględnieniem sztucznej inteligencji – głębokich sieci neuronowych).

Dalej zostanie przedstawiony skrótowy opis systemu HMASSUT Prometheus. Na rys. 15 przedstawiono w postaci graficznej ideę systemu.

Uzupełnieniem systemu jest samochód elektryczny, dlatego skrótowo zostanie opisana jego konstrukcja. Powstała ona na bazie samochodu elektrycznego opracowanego w ramach projektu „ECO-Mobilność” (realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2007–2016).



Rys. 14. Ilustracja opracowanego już systemu PRT, stanowiącego istotę systemu HMASSUT Prometheus (wraz z preprototypami)



HYBRID – because, referring to the electric drive, it does not eliminate the use of others (CNG, hydrogen fuel drives, fuel cells) – ponieważ nie eliminuje innych systemów niskoemisyjnych (gaz LNG, wodór, akumulatory przepływowe)

MODULAR – because it enables adaptive system design, using all its modules or only some – ponieważ umożliwia „składanie” systemu jak z klocków Lego (można wykorzystać wybrane lub wszystkie moduły systemu)

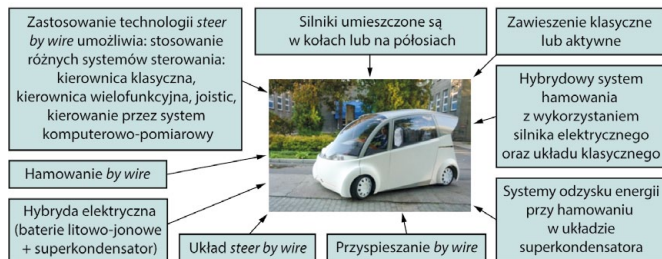
AUTOMATED – because it uses technologies allowing traveling in “driverless” mode – ponieważ umożliwia pracę w modzie driverless



Rys. 15. Ilustracja systemu oraz wizytacja efektów projektu przez komisarz europejską ds. transportu Violetę Bulc



Eco samochód elektryczny



Rys. 16. Preprototyp samochodu elektrycznego opracowanego przez Politechnikę Warszawską (projekt „ECO-Mobilność”, POIG, kierownik W. Choromański, 2009–2015) wraz ze schematem niektórych funkcjonalności

Aktualnie system wyposażony jest w system automatyzacji identyczny do systemu zainstalowanego w pojazdach PRT poruszających się po jezdni. Tylko tam może poruszać się w trybie *driverless* (bez kierowcy). W pozostałych jest samochodem elektrycznym przystosowanym do przewozu zarówno osób sprawnych, jak i niepełnosprawnych, o ograniczonej mobilności. Opisane systemy mogą być wykorzystane w transporcie miejskim do przewozu ludzi i ładunków oraz do transportu specjalistycznego – medycznego (integrując sieć szpitali czy łącząc np. gminy z jednostkami opieki zdrowotnej w metropoliach). Mogą stanowić transport ekologiczny usytuowany w specjalnych miejscach – parkach narodowych. W zastosowaniach miejskich (dużych metropoliach) będą miały charakter komplementarny do już eksploatowanych masowych systemów,

jak metro (np. dowóz mieszkańców z nowych osiedli do dużych hubów transportowych). Dla mniejszych miast mogą stanowić podstawowy szkielet transportowy. Należy mocno podkreślić dużą uniwersalność i skalowalność systemu.

Literatura

- ACHARYA S.R.: *Motorization and urban mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation*. „Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies” 2/2005.
- ACRP REPORT 37: *Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports*, Transportation Research Board, Washington 2010.
- ANDERSON J.E.: *An Intelligent Transportation Network System*, PRT International, LLC, Minneapolis 2011.
- ANDERSON J.E.: *High-Capacity Personal Rapid Transit: Rationale, Attributes, Status, Economics, Benefits*. LLC, Minneapolis 2007.
- ANDREASSON I.: *Innovative Transit Systems: Survey of current developments*. VINNOVA Report VR 2001:3, The Swedish Agency for Innovation Systems.
- ANDREASSON I.: *Innovativa kollektiva trafiksystem*. KFB-Rapport 2000.
- ASCE: *Automated People Mover Standard*. American Society of Civil Engineers, 2013.
- ATRA: *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report, 2003.
- BUCHANAN M., ANDERSON J.E., TEGNER G., FABIAN L., SCHWEIZER J.: *Emerging Personal Rapid Transit Technologies Introduction, State of the Art, Applications*, w: *Proceedings of the conference*, Bologna, Italy 2005.
- BURTON E., JENKS M., WILLIAMS K.: *Achieving sustainable urban form*. Routledge 2013.
- CHAPMAN H., CHAPMAN M., CEDER A.: *An Architectural Approach to Sustainable Transport Design: SkyCabs Elevated Small Group Automated Rapid Transit (ESGART)*. ATRF 2009 32 Australasian Transport Research Forum, SkyCity Auckland Convention Centre, Auckland, New Zealand 2009.
- CHOROMAŃSKI W.: *Personal Rapid Transit – Selected Problems*. WSEAS International Conference, Arcachon, France 2007.
- CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Minimizing the Impact of Electromagnetic Interference Affecting the Control System of Personal Rapid Transit in the Context of the Competitiveness of the Supply Chain* [w:] *Archives of Transport*. Polish Academy of Sciences, t. 23, z. 2, Warszawa 2011.
- CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Zapobieganie zakłóceniom w liniach zasilania i układach zasilających system PRT*. „Logistyka” 3/2011.
- CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Zapobieganie zakłóceniom w liniach zasilania i układach zasilających system PRT*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna LogiTrans, Szczyrk 2011.
- Fragment pochodzi z książki:
Pojazdy autonomiczne i systemy transportu autonomicznego,
 W. Choromański, I. Grabarek, M. Kozłowski, M. Czerepicki, K. Marczuk,
 Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020

Współczesny elektryczny napęd trakcyjny. Przykłady elektrycznych napędów trakcyjnych

Andrzej Dębowski

Przez wiele lat elektrycznym silnikiem powszechnie stosowanym do napędu wszelkich pojazdów zasilanych energią elektryczną był komutatorowy szeregowy silnik prądu stałego (DC-SM, ang. *direct-current series motor*). Wyczerpujące informacje na temat jego budowy, a także równań matematycznych opisujących zachowanie się w stanach ustalonych i dynamicznych i wynikających z nich charakterystyk mechanicznych można znaleźć przede wszystkim w literaturze poświęconej zasadom budowy i eksploatacji klasycznego elektrycznego napędu trakcyjnego, jak [A4], ale również w wielu książkach poświęconych maszynom i napędom elektrycznym, na przykład [B1, B6, B7, B8, B9, B15, B22]. Powodem tej popularności silników szeregowych były ich charakterystyki mechaniczne, wynikające z hiperbolicznej zależności momentu wewnętrznego (elektromagnetycznego) od chwilowej prędkości kątowej wału silnika $M_{we} = f(\Omega)$. Ta ich cecha była unikalna w czasach, gdy wszelkie silniki elektryczne były zasilane ze źródeł o stałym napięciu, a ich układy sterowania wykorzystywały jedynie dodatkowe oporniki szeregowo podłączone do uzwojeń twornika lub wzbudzenia. Przy stałych parametrach w obwodach silnoprądowych nawet przy niewielkim obniżeniu prędkości obrotowej (np. przy najechaniu koła na przeszkodę) samoczynnie (tj. bez jakiegokolwiek ingerencji ze strony zewnętrznego układu sterowania) pojawiał się wtedy prawie natychmiast wzrost momentu wewnętrznego, pozwalający na skuteczne pokonanie takiej przeszkody, i odwrotnie – przy raptownym wzroście prędkości (np. przy wystąpieniu poślizgu kół) następował gwałtowny spadek momentu wewnętrznego. Bardzo ułatwiało to prowadzenie pojazdów z takim napędem.

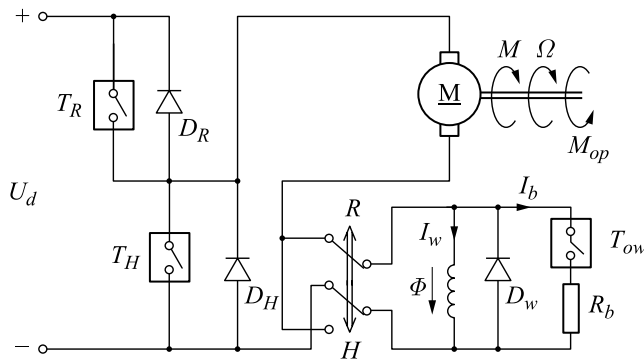
Współcześnie wymaga się jednak zdecydowanie więcej od napędów, nie tylko jeśli chodzi o ich właściwości trakcyjne związane z potrzebą precyzyjnego sterowania chwilową wartością momentu wewnętrznego rozwijanego przez silnik, chodzi także o dodatkowe możliwości, jak kontrolowany zwrot energii do źródła – sieci lub akumulatora. Wymaga to częstych i niezależnych od siebie zmian kierunków prądów twornika i wzbudzenia. Skoro uzwojenie wzbudzenia i tak w zautomatyzowanym napędzie trakcyjnym czasem musi być przełączane, to fakt, że w warunkach znamionowych płyną przez nie bardzo duże wartości prądów, nawet w epoce stosowania przekształtników energoelektronicznych sprawia liczne kłopoty – utrudnia montaż, a potem konserwację obwodów roboczych (kable są grube i sztywne, aparatura łączeniowa na duże prądy ma duże gabaryty, moduły energoelektroniczne na duże prądy są wyraźnie droższe). Ważnym utrudnieniem jest też fakt, że silniki szeregowo były projektowane do bezpośredniego podłączenia do określonego napięcia sieci trakcyjnej, a więc osobne zasilanie ich uzwojeń – przewidzianych przecież do pracy w połączeniu szeregowym – bezpośrednio z tej sieci jest utrudnione ze względu na niedopasowanie napięciowe (dotyczy to zwłaszcza szeregowego uzwojenia wzbudzenia!). Dlatego napędy trakcyjne z silnikami szeregowymi są spotykane obecnie jedynie tam, gdzie jeszcze nie opłacało się ich wymienić na inne. Przy wprowadzaniu przekształtników poprawiających właściwości napędów z tymi silnikami w istniejących pojazdach korzysta się więc doraźnie z uproszczonych rozwiązań, sprowadzających się do wykorzystania zwykłych czoperów pracujących w rozmaitych konfiguracjach. Rozwiązania takie stosuje się ze

względu na ograniczenie dostępnego miejsca w modernizowanych pojazdach czy chęć ograniczania kosztów modernizacji, a także ze względu na trudności techniczne dotyczące kompleksowej przebudowy okablowania.

Istnieje bardzo duża liczba różnych praktycznych rozwiązań zautomatyzowanych napędów trakcyjnych nadal wykorzystujących silniki szeregowo prądu stałego. Powszechnie w charakterze elementów regulacyjnych w różnych obwodach prądu stałego, więc także w napędach z silnikami elektrycznymi prądu stałego, wykorzystuje się proste i tanie przerywacze energoelektroniczne – tzw. czopery (ang. *chopper*), co nawet przyczyniło się do powstania żargonowego określenia takiego rodzaju napędu trakcyjnego – „napęd czoperoowy”. W napędach z szeregowymi silnikami prądu stałego jednak nie zawsze udaje się w pełni wykorzystać możliwości oferowane przez układ napędowy całkowicie zautomatyzowany, zwłaszcza jeśli są to napędy powstające na drodze modernizacji istniejących wcześniej rozwiązań i konieczny jest pewien kompromis między poprawą jakości napędu a kosztami jego modernizacji.

Na rysunku 1 przedstawiono jedno z proponowanych rozwiązań, które jednak daje takie możliwości. Układ silnoprądowy obejmuje: silnik szeregowo z rozdzielonymi uzwojeniami twornika i wzbudzenia, półmostek z dwoma kluczami z diodami zerowymi odwrotnie podłączonymi do kluczy, pozwalający na regulację przepływu prądu twornika w obu kierunkach (takie zestawy elementów są oferowane obecnie przez producentów jako jeden moduł), przełącznik zmiany kierunku podłączenia uzwojenia szeregowego zabezpieczonego diodą zerową do obwodu twornika (powodujący, że niezależnie od

Rys. 1. Schemat ideowy przykładowego zautomatyzowanego napędu trakcyjnego z szeregowym silnikiem prądu stałego



aktualnego kierunku prądu twornika kierunek prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzenia, a więc i kierunek głównego strumienia magnetycznego, nie ulega zmianie przy przechodzeniu silnika od rozruchu do hamowania (elektrodynamicznego) oraz opornik bocznikujący uzwojenia wzbudzenia z szeregowo połączonym dodatkowym przerywaczem-czoperem (pozwalający na płynną regulację osłabiania pola, stosowaną przy wyższych prędkościach obrotowych silnika w celu ograniczenia wartości siły elektromotorycznej rotacji indukującej się w uzwojeniach twornika).

Przy rozpędzaniu silnika pracuje górny klucz półmostka, włączony szeregowo w obwód twornika, który działa jako elektroniczny przekształtnik DC/DC obniżający napięcie sieci (ang. *buck converter* lub *step-down converter*) do poziomu odpowiadającego danej prędkości obrotowej. W tej konfiguracji współpracuje on z diodą drugiego klucza, pełniącą rolę diody zerowej dla obwodu twornika. W trakcie hamowania elektrodynamicznego górny klucz pozostaje wyłączony i silnik pozostaje połączony z siecią przez jego diodę zwrotną. Jeżeli prędkość obrotowa silnika jest duża, a odpowiadająca jej siła elektromotoryczna rotacji przewyższa napięcie sieci, to prąd twornika płynie do sieci bezpośrednio przez diodę zwrotną górnego klucza, a regulacja wartości tego prądu odbywa się poprzez regulację stopnia osłabienia strumienia wzbudzenia dzięki regulacji współczynnika wypełnienia pracy czopera okresowo podłączającego opornik bocznikujący do uzwojenia wzbudzenia. Jeśli siła elektromotoryczna rotacji jest mniejsza od napięcia sieci, to nadal możliwe jest przekazywanie energii elektrycznej z obwodu twornika do sieci. Wymaga to jednak aktywnej pracy

dolnego klucza w półmostku, polegającej na okresowym krótkotrwałym zwieraniu obwodu twornika. Przy zwarciu tego klucza, dzięki obecności indukcyjności w obwodzie twornika, narastający prąd twornika magazynuje coraz więcej energii w polu magnetycznym uzwojenia wirnika, a w chwilach rozwarcia tego klucza – zgodnie z regułą zachowania ciągłości, zaczyna płynąć do sieci przez diodę klucza górnego i malejąc, przekazuje do niej część tej zmagazynowanej energii. Prąd twornika przy hamowaniu dynamicznym może więc popłynąć do sieci, nawet jeśli prędkość obrotowa silnika jest niewielka, ponieważ do siły elektromotorycznej rotacji silnika dodaje się siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika, pojawiająca się w chwili przerwania zwarcia obwodu twornika przez otwierający się klucz. Ten klucz działa wtedy jako przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie (ang. *boost converter* lub *step-up converter*) i jest w stanie spowodować, że krótkotrwałe – przez odpowiednią diodę – prąd popłynie do sieci, nawet jeśli jej napięcie jest wyższe niż siła elektromotoryczna rotacji istniejąca w silniku.

Jeśli sieć trakcyjna nie może odbierać energii od hamującego pojazdu, to dla uzyskania efektu hamowania elektrodynamicznego (i tym samym łatwego do kontrolowania momentu hamującego na wale silnika) w omawianym układzie, tak jak w każdym napędzie elektrycznym, równolegle do obwodu głównego podłączonego do sieci umieszcza się dodatkową gałąź zawierającą rezystor dużej mocy, służący do rozpraszania energii elektrycznej odzyskanej w wyniku hamowania. Takiego układu rozpraszania energii hamowania nie pokazano na omawianym rys. 1, bo stanowi on standardowe wyposażenie każdego napędu

elektrycznego, umożliwiające uzyskanie w napędzie momentu hamującego nawet w przypadku awaryjnym, gdy z jakiegoś powodu źródło zasilające napęd nie może odebrać energii od silnika pracującego jako prądnica (generator). Specjalny, dodatkowy czoper, szeregowo połączony z tym rezystorem, jest sterowany tak, by w czasie hamowania utrzymywać w obwodzie głównym stałe napięcie na zadanym poziomie (może ono być nawet wyższe od napięcia sieci – która, jeśli nie jest zdolna do odbierania energii, może zostać wtedy w ogóle odłączona przez stycznik główny – i w ten sposób umożliwić osiągnięcie wyjątkowo dużej wartości momentu hamującego). W napędach zautomatyzowanych możliwe jest także uzyskanie hamowania elektrodynamicznego w pojeździe, który porusza się swobodnie z dużą prędkością i nie jest w danej chwili zasilany z sieci. Po włączeniu napędu dzięki magnetyzmowi szczątkowemu w maszynie możliwe jest uzyskanie efektu samowzbudzenia się pola magnetycznego i rozwinięcie dużej wartości momentu hamującego pozostającego pod pełną kontrolą układu sterowania napędem.

Z teorii maszyn elektrycznych dotyczącej właściwości regulacyjnych obcowzbudnego silnika prądu stałego wynika, że do uzyskania pełnych możliwości regulacji momentu i sterowania przepływem energii elektrycznej trzeba mieć możliwość niezależnego sterowania prądem twornika i prądem wzbudzenia, co oznacza, że te uzwojenia powinny być fizycznie od siebie oddzielone – czyli powinna to być po prostu maszyna specjalnie skonstruowana do tego celu. Wtedy wystarczy, że uzwojenie wzbudzenia będzie nawinięte cienkim drutem, a odpowiednio zwiększona zostanie jego liczba zwojów, co spowoduje znaczne zmniejszenie wartości prądu wzbudzenia potrzebnego do uzyskania tego samego strumienia magnetycznego, a wtedy regulacja wzbudzenia potrzebna do prawidłowego wykorzystania możliwości silnika w napędzie trakcyjnym będzie łatwa do uzyskania.

Warto tu jednak zauważyć, że tradycyjne szeregowo silniki komutatorowe prądu stałego stopniowo odchodzą do historii we wszystkich zastosowaniach. Głównie z powodu bardzo poważnej

wady – obecności mechanicznego komutatora i trących się o niego szczotek. Wiąże się z tym bowiem:

- konieczność regularnego sprawdzania stanu szczotek i okresowego przetaczania komutatora, aby usunąć rowki na miedzianych wycinkach spowodowane przez szczotki, a pogarszające jakość styku (układy energoelektroniczne nie wymagają żadnej konserwacji);
- konieczność unikania nawet chwilowych przeciążeń silnika, gdyż wystąpienie dużych wartości prądu twornika w trakcie mechanicznej komutacji następującej między wycinkami komutatora powoduje pojawianie się łuku wypalającego szczotki i wycinki komutatora, a w konsekwencji na ogół poważne uszkodzenie komutatora (moduły energoelektroniczne można swobodnie przeciążać, jeśli zapewni im się odpowiednie chłodzenie);
- konieczność ochrony komutatora przed wilgocią i nadmiernymi wstrząsami (silniki prądu przemiennego, jeśli mają odpowiednią izolację, mogą pracować zalane wodą i są bardzo odporne na wszelkie wibracje).

Z tego powodu współczesne nowe konstrukcje elektrycznych napędów trakcyjnych wykorzystują niemal wyłącznie asynchroniczne lub synchroniczne silniki prądu przemiennego z trójfazowymi uzwojeniami stojanów, zasilane z mikroprocesorowo sterowanych falowników z zastosowaniem dosyć mocno złożonych obliczeniowo algorytmów sterowania.

Tramwajowy napęd elektryczny

W Polsce na przełomie XX i XXI wieku eksploatowanych było ponad 2 tysiące tramwajów typu 105N z klasycznym napędem z szeregowymi silnikami prądu stałego, z oporowym układem regulacji prądu. Ich wersja oznaczona jako 805N była dostosowana do węższych torów, z powodów historycznych istniejących w takich miastach, jak Bydgoszcz, Elbląg, Grudziądz, Łódź czy Toruń. Przez wiele lat postęp techniczny w ich modernizacji polegał na stopniowym zastępowaniu logicznymi układami elektronicznymi pomocniczych przekaźników sterujących elektromechanicznymi stycznikami prądu stałego, służącymi nadal do

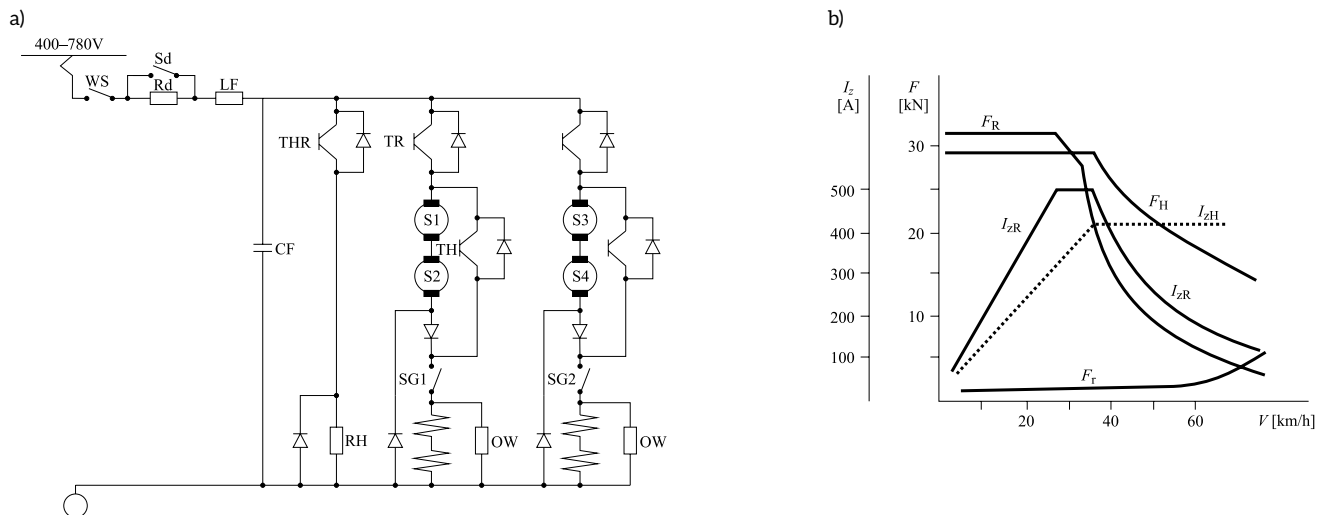
przełączania tradycyjnych rezystorów w prądowych obwodach roboczych silników. Przełom nastąpił dopiero pod koniec XX stulecia, po pojawieniu się na rynku energoelektronicznych przyrządów półprzewodnikowych. Pierwsze krajowe napędy przekształtnikowe, oparte na tyrystorach wyłączalnych GTO wykorzystywanych w charakterze przerywaczy prądu (czoperów), wyprodukował na licencji Instytutu Elektrotechniki z Międzyzlesia k. Warszawy w 1996 roku Zakład Aparatury Elektrycznej Woltan z Łodzi. Do 2001 roku zainstalowano je w ok. 150 tramwajach, wyposażonych nadal w dotychczas znajdujące się w nich silniki szeregowo. Te impulsowe układy napędowe nie tylko umożliwiły płynne sterowanie momentem napędowym silników, ale pozwalały także na ich pracę ze zwrotem energii do sieci trakcyjnej przy elektrodynamicznym hamowaniu pojazdu, czyli tzw. rekuperację (odzysk) energii kinetycznej. Należy jednak pamiętać, że ze względu na prostowniki powszechnie instalowane w transformatorowych podstacjach zasilających sieć trakcyjną taka rekuperacja jest możliwa jedynie w tym przypadku, gdy inne pojazdy zasilane akurat z tej samej sekcji sieci są w stanie wykorzystać taką nadwyżkę mocy, pojawiającą się przecież chwilowo i zwykle niespodziewanie. W przeciwnym bowiem razie wykrycie nadmiernego lokalnego wzrostu napięcia sieci trakcyjnej, mierzonego na odbieraku przez układ elektroniczny sterujący napędem hamującego tramwaju, powoduje podłączenie do obwodu twornika silnika przez ten sam czoper specjalnego rezystora hamowania i kontrolowane tym czoperem nieodwracalne już rozproszenie w nim istniejącej nadwyżki energii kinetycznej pojazdu. Hamulce mechaniczne tramwaju są wtedy nadal oszczędzane, ale odzysku (rekuperacji) energii elektrycznej – nie ma. W dalszych wersjach tych napędów w charakterze kluczy pracujących impulsowo zastosowano nowoczesne tranzystory mocy, czyli bipolarne tranzystory z izolowaną bramką, tzw. IGBT (ang. *insulated gate bipolar transistor*), (rys. 2).

Tramwajowy napęd impulsowy pokazany na rysunku 2a charakteryzuje się bezstykową realizacją poszczególnych faz jazdy: rozruch – wybieg – hamowanie.

W jego skład wchodzi następujące elementy: WS – wyłącznik główny, Rd – opornik ograniczający prąd ładowania kondensatora filtra sieciowego przy włączaniu napędu, Sd – stycznik zwierający opornik filtra po dokonaniu włączenia napędu, LF – dławik filtra sieciowego, CF – kondensator filtra sieciowego, THR – tranzystor hamowania oporowego, RH – rezystor hamowania (zestaw oporników), S1, S2 oraz S3, S4 – uzwojenia tworników silników trakcyjnych połączone ze sobą szeregowo, parami instalowanych na tym samym wózku, SG1, SG2 – styczniki główne dla poszczególnych grup silników. W każdej z tych dwóch grup silników oznaczono: TR – tranzystor rozruchu, TH – tranzystor hamowania, OW – układ osłabiania wzbudzenia silników (bocznikujący połączone szeregowo uzwojenia wzbudzenia obu silników znajdujących się w danej gałęzi obwodu). Diody występujące na tym schemacie bez oznaczeń są diodami zwrotnymi (tzw. zerowymi) i służą do likwidacji przepięć, które pojawiają się przy przerywaniu prądów płynących w obwodach zawierających indukcyjności przez otwierające się klucze tranzystorowe.

Dwie grupy silników są zasilane przez oddzielne przekształtniki IGBT. Dwutranzystorowy moduł IGBT włączony jest tak, że faza rozruchu jest regulowana tranzystorem TR, a faza hamowania tranzystorem TH. Przejście z jazdy na hamowanie nie wymaga żadnych przełączeń, lecz tylko wyłączenia tranzystorów TR i włączenia tranzystorów TH. W ten sposób w porównaniu z układem tradycyjnym uzyskuje się znaczne skrócenie czasu uzyskania pełnej siły hamowania oraz skrócenie drogi hamowania tramwaju. W obwodzie występują tylko styczniki grupowe (załączenia grupy silników), włączane i wyłączane bezprądowo przed uruchomieniem tramwaju.

Pierwsze polskie tramwajowe napędy asynchroniczne, z grupowym skalarnym sterowaniem napięciowym, w którym falowniki przydzielone do poszczególnych wózków napędowych zasilają w systemie otwartym (tzn. bez prądowych sprzężeń zwrotnych) klatkowe silniki indukcyjne połączone w pary (rys. 3), zaczęto instalować w modernizowanych tramwajach na przełomie



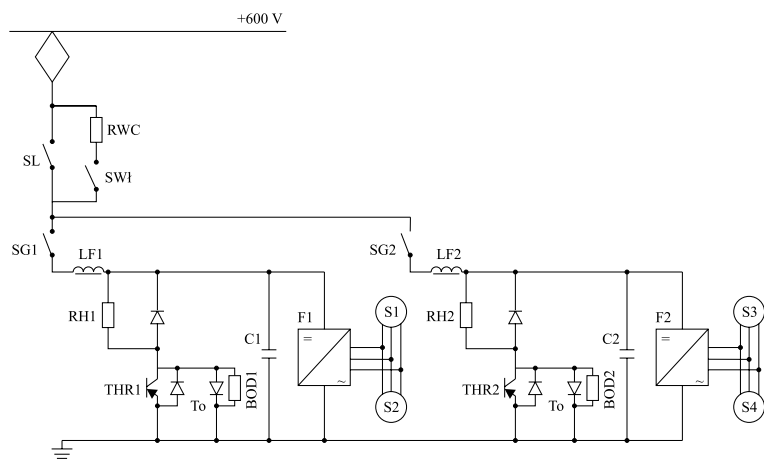
Rys. 2. Impulsowy napęd prądu stałego ze wspólnym prądowym sterowaniem obu silników szeregowych prądu stałego w każdym z wózków wagonu silnikowego, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w IEL Warszawa i produkowany przez ZAE WOLTAN w Łodzi: a) schemat ideowy obwodu głównego; b) graniczne charakterystyki trakcyjne (F_R – siły napędowej przy rozpędzaniu; F_H – siły napędowej przy hamowaniu, skierowanej w przeciwną stronę do ruchu pojazdu; F_r – siły oporów ruchu; I_{zR} – prądu roboczego przy rozpędzeniu; I_{zH} – prądu roboczego przy hamowaniu)

Źródło: [A21, A23]

stuleci. Takimi napędami były falownikowe napędy asynchroniczne opracowane w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie we współpracy z Tramwajami Warszawskimi [A22] oraz w firmie MEDCOM z Warszawy [A20].

W skład tramwajowego napędu asynchronicznego, pokazanego na rysunku 3, wchodzi następujące elementy: SL – stycznik liniowy, SG1, SG2 – styczniki główne dla poszczególnych grup silników, SW1 – stycznik wstępnego ładowania filtra, RWC – opornik ograniczający prąd ładowania filtra, LF1, LF2 – dławiki grupowych filtrów sieciowych, C1, C2 – kondensatory grupowych filtrów sieciowych, S1, S2 oraz S3, S4 – trójfazowe trakcyjne silniki asynchroniczne z uzwojeniami stojanów połączonymi ze sobą równolegle, parami instalowane na tym samym wózku, F1, F2 – falowniki napięciowe z tranzystorami IGBT zasilające każdą z dwóch grup silników asynchronicznych, THR1, THR2 – tranzystory hamowania oporowego (z podłączonym równolegle do każdego z nich własnym zestawem ochronnym, składającym się z tyrystora ochronnego T_o sterowanego układem nadnapięciowym BOD), RH1, RH2 – rezystory hamowania (zestawy oporników).

Sterowanie skalarne polega, jak wiadomo, wyłącznie na wytwarzaniu przez



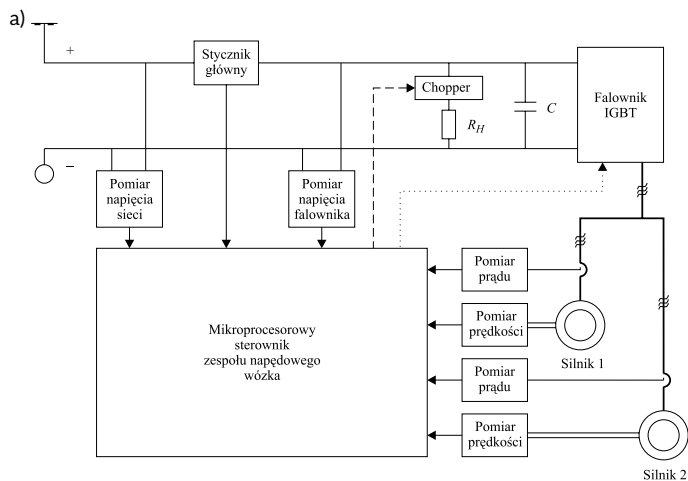
Rys. 3. Falownikowy napęd asynchroniczny z grupowym, wspólnym napięciowym sterowaniem obu silników w każdym z wózków, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w IEL Warszawa we współpracy z Tramwajami Warszawskimi

Źródło: [A22]

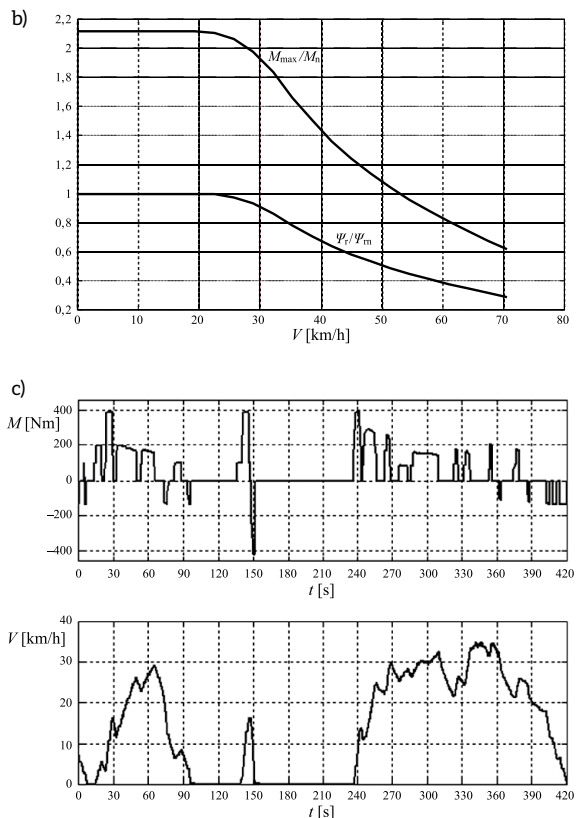
falownik napięcia o regulowanej częstotliwości przy zachowaniu stałego stosunku amplitudy tego napięcia do częstotliwości (tzw. sterowanie U/f), bez podporządkowanej mu, jak w kaskadowych napędach prądu stałego, regulacji prądu roboczego silnika i bez kontrolowania wartości momentu rozwijanego przez silnik [B6, B19, B25, B30, B33].

Na rysunku 4 przedstawiono przykład napędu, opracowanego w 2003 roku w Instytucie Automatyki PŁ we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi i po raz

pierwszy przetestowanego na modernizowanym tramwaju udostępnionym przez MPK Łódź. W układzie napędowym ENI-ZNAP także są wykorzystane dwa silniki indukcyjne zasilane z jednego falownika napięciowego. Ale zastosowano tu już po raz pierwszy w Polsce sterowanie wektorowe według własnego pomysłu, a mianowicie sterowanie prądowo zorientowane [A7, A8, A9, A10, A13, A14, A15, A16, A39]. Omawiane tu rozwiązanie jest przeznaczone do zabudowy w modernizowanych wagonach



Rys. 4. Falownikowy, asynchroniczny napęd wózka tramwajowego z wektorowym sterowaniem prądowo zorientowanym jednego z silników, przeznaczony do tramwajów typu 105N, opracowany w Politechnice Łódzkiej we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi: a) schemat ideowy; b) założone charakterystyki statyczne zależności od prędkości jazdy tramwaju: amplitudy strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem wirnika oraz momentu wewnętrznego dla pojedynczego silnika; c) przebieg prędkości tramwaju (poniżej) i momentu zadawanego przez motorniczego na każdy z silników (powyżej), zarejestrowane w czasie jazdy ulicznej Źródło: [A7, A10]



typu 105N, nadal eksploatowanych w Polsce, w których zamiast dotychczasowych silników prądu stałego są montowane cztery asynchroniczne silniki trakcyjne typu STDa 200L4 produkcji EMIT Żychlin o mocy 50 kW każdy. Silniki są zasilane za pomocą falowników ENI-F600/360/3H zamontowanych w przestrzeni po rozruszniku oporowym GBT.

Sterowanie to stanowiło rozwinięcie koncepcji sterowania opracowanej i wdrożonej w tyrystorowych falownikach prądowych z klatkowymi silnikami indukcyjnymi o mocy 10 kW, skonstruowanych na początku lat osiemdziesiątych XX wieku w Instytucie Automatyki PŁ na zamówienie Ośrodka Badawczo-Rozwojowego CHEMOAUTOMATYKA z Warszawy i zastosowanych do napędu tanków fermentacyjnych w Zakładach Farmaceutycznych POLFA w Pabianicach.

W omawianym tu napędzie sterowanie momentem wewnętrznym silnika odbywa się za pośrednictwem zadawania amplitudy wektora prądu stojana i chwilowego położenia kąтового zsynchronizowanego wirującego układu współrzędnych odniesienia. Do tego

wirującego, prądowo zorientowanego układu współrzędnych są przeliczane składowe rzeczywistego wektora prądu stojana mierzone w nieruchomym układzie współrzędnych i porównywane z wartościami zadanymi (zadawana składowa urojona prądu jest oczywiście zawsze równa zero). Na podstawie tak wyznaczonych błędów odtwarzania przez falownik w uzwojeniach silnika zadawanego wektora prądu wektorowy regulator prądu oblicza odpowiednie składowe wektora napięcia stojana, które po przeliczeniu do układu nieruchomego służą w modulatorze PWM do wyznaczania chwil przełączeń kluczy falownika napięciowego.

W układzie napędowym przedstawionym na rysunku 4 oba silniki są zasilane z tego samego falownika, ale wektorowo jest sterowany tylko jeden z nich – ten, który wybrano do pracy w układzie zamkniętym ze sprzężeniami zwrotnymi od wektora prądu stojana i od prędkości kątovej wirnika. W sytuacji, gdy w drugim silniku (identycznym jak ten pierwszy – sterowany, i za nim nadążającym) uzwojenia jego stojana są zasilane dokładnie tym samym napięciem, a jego wał pozostaje praktycznie

sprężnięty za pośrednictwem kół o tych samych średnicach, toczących się po tym samym podłożu, mamy do czynienia ze specyficzną odmianą napędu grupowego. Nadążanie tego drugiego silnika, zasilanego napięciem w układzie otwartym, towarzyszącego pierwszemu – sterowanemu, wynika z naturalnych właściwości maszyn asynchronicznych. W silnikach indukcyjnych moment napędowy jest funkcją różnicy prędkości (poślizgu) występującego pomiędzy wirującym polem magnetycznym stojana a wirnikiem. Jeśli wał silnika towarzyszącego (nadążającego za silnikiem sterowanym) przyspieszy w stosunku do wału silnika sterowanego, to jego poślizg się zmniejszy i zmniejszy się rozwijany moment napędowy, nie pozwalając na nadmierny wzrost prędkości. I odwrotnie, jeżeli silnik towarzyszący zostanie przyhamowany, to jego poślizg wzrośnie i odpowiednio wzrośnie moment napędowy, pozwalając na pokonanie zwiększonych oporów. Pomiar prądu i prędkości w silniku niesterowanym (towarzyszącym) służą jedynie kontroli poprawności jego pracy i zwiększeniu niezawodności napędu. W przypadku uszkodzenia układów pomiarowych w silniku sterowanym

sterowanie może być przeniesione na drugi silnik. Przeniesienie sterowania może również nastąpić w przypadku stwierdzenia zbyt dużych różnic między stanami silników obserwowanych na podstawie mierzonych przebiegów prądu i prędkości kątowej.

Choć obecnie w Polsce w nowych tramwajach projektowane są głównie układy napędowe z silnikami asynchronicznymi, jednak czoperowy napęd DC jest nadal konkurencyjny w przypadku modernizacji istniejących tramwajów wyposażonych w szeregowy silnik prądu stałego. Ze względu na mniejsze gabaryty silników AC przy tych samych mocach uważa się, że napęd asynchroniczny jest uzasadniony technicznie dla pojazdów szynowych o mocy większej niż 1 MW na oś oraz w tramwajach niskopodłogowych. W pozostałych przypadkach tego uzasadnienia nie ma. Dlatego rozwiązania sterowania impulsowo silnika prądu stałego mogą znajdować zastosowanie przede wszystkim w tramwajach. Problemem pozostaje jednak w tym przypadku awaryjność silników prądu stałego i częstsze przeglądy konserwacyjne.

Eksploatacja pierwszych tramwajowych napędów asynchronicznych z silnikami indukcyjnymi zasilanymi grupowo ze wspólnego falownika napięciowego i sterowanymi w układach otwartych (bez prądowych sprzężeń zwrotnych) wykazała, że w przypadku wystąpienia w jednym z silników należących do takiej grupy raptownych zaburzeń w jednostajnym ruchu obrotowym jego wirnika, w stosunku do wirowania wektora napięcia wyjściowego falownika w uzwojeniach fazowych jego stojana, pojawiają się duże wartości chwilowe w przebiegach prądów [A7, A9, A10]. Takie gwałtowne skoki wartości prądów obciążenia falownika mogą w skrajnym przypadku doprowadzić do nieoczekiwanych wyłączeń całego napędu w trybie awaryjnym, co jest wielce niepożądane ze względów ruchowych, gdyż niespodziewane zatrzymanie tramwaju w trakcie normalnej jazdy w mieście pociąga za sobą poważne zakłócenia w działaniu komunikacji miejskiej. Powód ten przez bardzo długi czas był przyczyną pewnej niechęci pracowników przedsiębiorstw komunikacji miejskiej do wprowadzania napędów asynchronicznych do

normalnej eksploatacji w pojazdach takich, jak tramwaje czy trolejbusy. Przyczyną takich zaburzeń mogą być czasem nieoczekiwane poślizgi jednej z dwóch osi kół napędowych danego wózka, ale przede wszystkim są nimi przejazdy pojazdu poruszającego się ze zbyt dużą prędkością przez zwrotnice, rozjazdy i krzyżaki, które powodują „stukanie” kół natrafiających na poprzeczne nierówności torowiska. Szczególnie może być to dotkliwie, gdy koła napędzane przez różne silniki, ale zasilane z tego samego falownika, w wyniku niejednakowego zużycia ich obręczy mają zauważalne różnice w średnicach.

W trakcie normalnej jazdy po gładkim torze obręcze (wieńce) kół pojazdu szynowego toczą się swoimi powierzchniami tocznymi po płaskiej główce szyny. Obrzeża tych obręczy, znajdujące się od strony wewnętrznej, mają nieco większą średnicę po to, by pojazd w czasie jazdy nie zsunął się z torowiska w bok. Wysokość obrzeża w odniesieniu do powierzchni tocznej obręczy zależy od typu pojazdu (kolej, tramwaj itp.) oraz od stopnia zużycia i waha się zwykle w granicach od 2,5 do 3,5 cm. Jeśli koło takie trafia na lukę w torze i jego obręcz przez krótką chwilę opiera się nie swoją powierzchnią roboczą na główce szyny, lecz jej obrzeżem na płaskim połączeniu pomiędzy szynami różnych torów, to może to oznaczać, że w ułamku sekundy pojazd oparty na osi takiego koła na krótką chwilę może unieść się nawet o 3,5 cm. Jak wiadomo z dostępnej literatury, w tramwaju 105N masa wagonu z pasażerami wynosi ok. 26 ton, zastosowane w napędach asynchronicznych cztery silniki mają moc po 50 kW każdy, a średnica kół wynosi 64 cm. Silniki asynchroniczne, mające po dwie pary biegunów, produkowane w zakładach EMIT w Żychlinie, zostały w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie zaprojektowane tak, by w modernizowanych tramwajach można je było wstawiać na miejsce dawnych silników szeregowych prądu stałego, łącząc z istniejącymi przekładniami mechanicznymi wózków. W wyniku tego znamionowej częstotliwości napięcia zasilania tych silników otrzymywanego z falowników wynoszącej 65 Hz odpowiada prędkość jazdy tramwaju wynosząca 31,5 km/h.

Jak wynika z powyższych danych, masa tramwaju przypadająca na jedną oś to $26 \text{ ton} / 4 = 6500 \text{ kg}$. W razie raptownego najeżdżania koła na tak niewielką wydatkałoby się przeszkodę (co oznacza skokowy wzrost średnicy koła o $3,5 / 64 \cdot 100\% = 5,5\%$), przyrost energii potencjalnej związanej z uniesieniem takiej masy w górę wyniesie $6500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,035 \text{ m} = 2,23 \text{ kWs}$. Przyrost tej energii odbywa się kosztem utraty energii kinetycznej, związanej z jadącym tramwajem, czy inaczej z obracającym się kołem lub jeszcze inaczej z wałem silnika sztywno sprzęgniętego z tym kołem. Taką utratę energii kinetycznej w pojeździe o stałej masie powoduje pojawienie się dodatkowego składnika momentu oporowego na wale silnika, mającego postać krótkotrwałego impulsu. Żeby nie pogrążyć się w żmudnych obliczeniach związanych ze szczegółową analizą czasową zjawisk towarzyszących takiemu zdarzeniu, można posłużyć się prostym oszacowaniem. Jeżeli czas trwania zdarzenia polegającego na najeżdżaniu koła na poprzeczną krawędź przeszkody oceni się na 0,1 sekundy, to następujący w tym czasie wzrost mocy obciążającej wał silnika wyniesie $2,23 \text{ kWs} / 0,1 \text{ s} = 22,3 \text{ kW}$ (ponieważ dla uproszczenia przekładnia została tu uznana za bezstratną). Jeśli tramwaj najeżdża na taki element torowiska z prędkością 15 km/h, to oznacza, że stojany wszystkich silników są zasilane napięciem o częstotliwości $(15 \cdot 65) / 31,5 = \text{ok. } 31 \text{ Hz}$, czyli wał silnika wykonuje $31 \text{ Hz} / 2 \text{ pary biegunów} = 15,5 \text{ obrotów}$ na sekundę, czyli obraca się z prędkością kątową ok. $2\pi \cdot 15,5 = 97,4 \text{ rad/s}$. Stąd skok momentu oporowego odpowiadającego obliczonemu wyżej skokowi mocy wynosi $22 \text{ 300 W} / 97,4 \text{ rad/s} = 229 \text{ Nm}$. Dla wyobrażenia sobie, co takie zdarzenie oznacza dla silnika indukcyjnego zasilanego ze źródła napięciowego, warto porównać tę liczbę z wartością znamionową momentu obrotowego tych silników. Przy zasilaniu ich napięciem o częstotliwości 65 Hz synchroniczna prędkość kątowa wału wynosi $2\pi \cdot 65 / 2 = 204,2 \text{ rad/s}$, a wartość znamionowa momentu – w przybliżeniu (pomijając niewielki poślizg) $50 \text{ kW} / 204,2 \text{ rad/s} = 245 \text{ Nm}$. Dlatego też trakcyjne napędy grupowe z kilkoma silnikami

asynchronicznymi zasilanymi ze wspólnego falownika są szczególnie wrażliwe na wszelkie zakłócenia związane z gwałtownymi szarpnięciami pojawiającymi się w ruchu obrotowym napędzanych nimi kół.

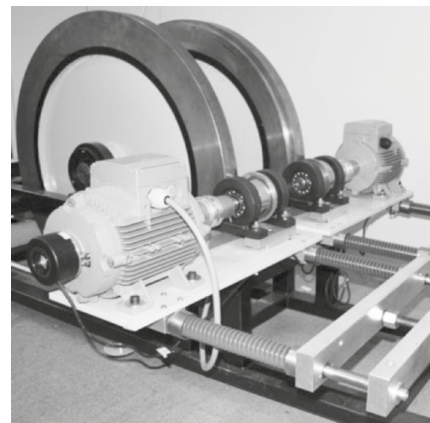
Jak z przeprowadzonych wyżej rozważań wynika, nawet tak niewielkie wydawałoby się „stuknięcie” koła o nierówność torowiska (tu trwające 0,1 s) wywołuje w sprzęgniętym z tym kołem silniku efekt gwałtownego, ale krótkotrwałego, pojawienia się na wale momentu obciążenia o wartości porównywalnej z wartością momentu znamionowego silnika. Problemowi związanemu ze zjawiskami zakłóceń pojawiających się w pracy dwusilnikowego napędu trakcyjnego, powodowanych nierównomiernością toczenia się kół jezdnych po wspólnym podłożu, postanowiono dokładniej przyjrzeć się w Zakładzie Techniki Sterowania Instytutu Automatyki PŁ w ramach projektu badawczego MNiSzW nr N N510 679740 pt.: „Grupowy trakcyjny napęd indukcyjny z pośrednią kontrolą momentu, zasilany z falownika napięciowego, pracującego z obniżoną częstotliwością przełączeń”, realizowanego w latach 2011–2013 [A11, A12]. W ramach tego projektu zbudowano oryginalne stanowisko badawcze do praktycznego testowania algorytmów sterowania dwusilnikowym napędem grupowym, przewidzianych do wykorzystania w trakcyjnych napędach asynchronicznych pojazdów szynowych (rys. 5).

Zamiast budować rzeczywisty tor z naturalnymi przeszkodami odwzorowującymi obecność zwrotnic, rozjazdów czy krzyżaków na trasie przejazdu, po którym jeździłby niewielki pojazd eksperymentalny, postanowiono odwrócić problem. Oba badane silniki zamocowano do nieruchomej ramy, a po ich kółkach o małych średnicach zamocowanych na ich wałach toczyło się „torowisko” w postaci dwóch sztywno ze sobą połączonych masywnych dużych stalowych kół (o łącznej masie ok. 350 kg) z zagłębioną na ich obwodzie powierzchnią toczną, wyfrezowaną mimośrodowo względem kolistej krawędzi zewnętrznej obrzeży. Uzyskane w ten sposób zmiany wielkości tego zagłębienia odpowiadały zjawisku „stawania” na krawędzi obrzeża

koła jezdnego w rzeczywistym pojeździe szynowym. Dzięki takiemu podejściu do rozwiązania problemu budowy stanowiska badawczego jego całość, zamiast zajmować spory obszar w terenie na zewnątrz budynku, zmieściła się na niewielkiej powierzchni w pokoju laboratoryjnym.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku napędów grupowych, gdzie dwa silniki są ze sobą połączone od strony zasilania elektrycznie tym samym falownikiem napięciowym, a od strony wałów mechanicznie – poprzez koła toczące się z tarciami lub bez, ale po wspólnej, lecz nierównej jezdni, istnieje zawsze możliwość takiego doboru algorytmu sterowania tymi silnikami, która pozwoli zmniejszyć niepożądane skoki wartości prądów w stojanach – bardziej lub mniej, ale nie wyeliminować całkowicie. Najskuteczniejsze jednak ograniczenie opisanych wyżej negatywnych zjawisk w każdym przypadku da się uzyskać jedynie w wyniku zastosowania do zasilania tych silników oddzielnych, niezależnych od siebie falowników, najlepiej z własnymi algorytmami sterowania wektorowego opartymi na możliwie dokładnej regulacji wektorów prądu obu stojanów. Ponieważ w przedstawionym wyżej stanowisku badawczym był zainstalowany jedynie jeden falownik, więc aby uzyskać potwierdzenie powyżej sformułowanej tezy, posłużono się modelowaniem komputerowym w programie PSIM tego „pojazdu”, jakim fizycznie to stanowisko było. Wyniki porównawczych badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 6.

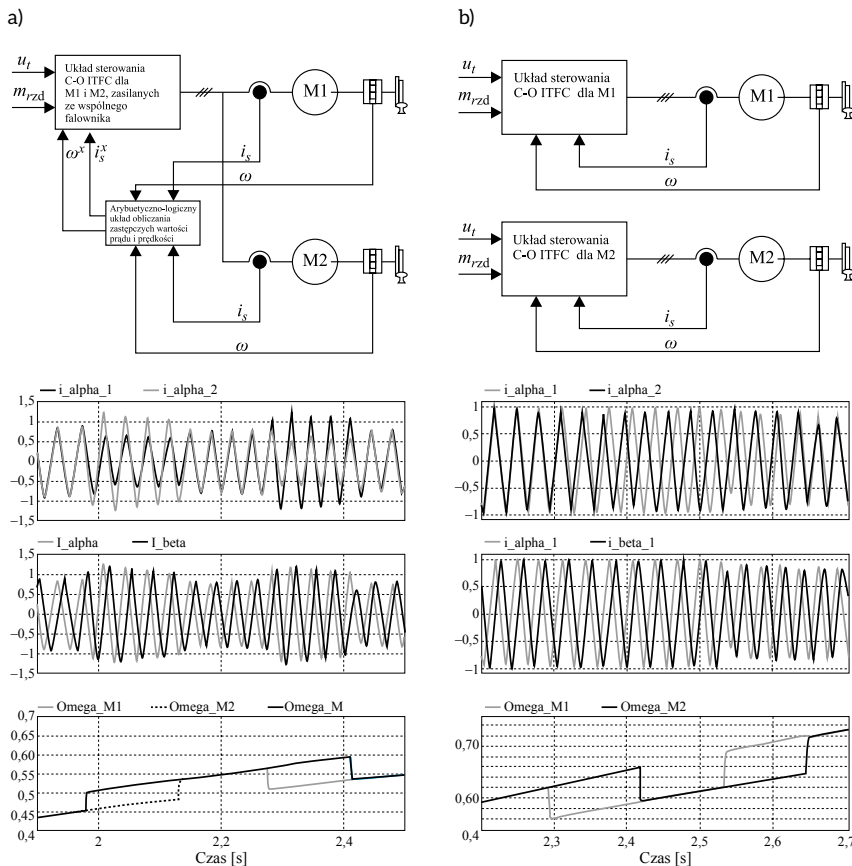
Obniżające się ciągle ceny wszelkich komponentów niezbędnych do budowy przekształtników energoelektronicznych oraz ich mikroprocesorowych sterowników powodują, że podzielenie w pojeździe jednego falownika o dużej mocy na kilka mniejszych falowników nie wiąże się już z nadmiernym wzrostem kosztów produkcji takich zindywidualizowanych napędów. Z punktu widzenia rozlokowania wewnątrz pojazdu urządzeń napędowych jest to nawet bardzo korzystne, bo zawsze łatwiej jest zbudować kilka mniejszych skrzynek niż jedną wielką. A ponadto wygoda polegająca na uproszczeniu algorytmów regulacyjnych oraz



Rys. 5. Stanowisko badawcze do modelowania pracy napędu trakcyjnego w stanach wywołanych nagłą zmianą prędkości kątowej kół pojazdu (Zakład Techniki Sterowania Instytutu Automatyki PŁ) Źródło: [A11]

pojawiająca się możliwość radykalnego poprawienia właściwości trakcyjnych pojazdów, dzięki niezależnemu od siebie kontrolowaniu zachowania się poszczególnych kół, jest znaczna. Warto przy tej okazji zauważyć, że w dawnych czasach, gdy w charakterze napędów o najwyższej jakości stosowane były powszechnie napędy prądu stałego z silnikami obcowzbudnymi i kaskadowym sterowaniem z podporządkowaną regulacją prądu twornika, każdy z tych silników miał przecież własny, od innych napędów zupełnie niezależny komutator. Także więc teraz w napędach z trójfazowymi silnikami prądu przemiennego falowniki zasilające uzwojenia stojanów stanowią rodzaj „komutatorów elektronicznych” (nawet o większych możliwościach regulacji niż te dawne – mechaniczne). Nie powinno więc być zaskoczeniem, że dla zapewnienia jak najlepszych właściwości eksploatacyjnych takich napędów te „komutatory” (czyli falowniki) rzeczywiście powinny być zindywidualizowane, czyli przypisane do konkretnego silnika. I taki trend wśród producentów tych silników jest już obecnie obserwowany, wiele bowiem firm produkujących kompaktowe silniki synchroniczne PMSM do specjalnych zastosowań (a więc dosyć drogie) oferuje je właśnie z falownikami i ich sterownikami już wmontowanymi bezpośrednio w obudowach stojanów.

Takich problemów z niejednakowym obciążeniem wałów kilku silników elektrycznych poruszających pojazd,



Rys. 6. Wyniki porównawczych badań symulacyjnych grupowego napędu trakcyjnego przy „jeździe” modelowego „pojazdu laboratoryjnego” po nierównościach torowiska w przypadku zasilania silników: a) z jednego falownika i wyborze większej spośród wartości modułu wektora prądu stojana pomierzonych w każdym z obu silników; b) z dwóch oddzielnych falowników z pełnym sterowaniem wektorowym dla każdego silnika, całkowicie niezależnych od siebie (C-O ITFC: prądowo zorientowane sterowanie pośrednie momentem i strumieniem, ang. *current-oriented indirect torque and flux control*)

Źródło: [A12]

wynikającego ze zmieniających się nagle warunków terenowych, na jakie natrafiają toczące się po powierzchni terenu koła napędowe pojazdu, nie spotyka się w trolejbusach, pojazdach w swej budowie i zasadach eksploatacji bardzo podobnych do tramwajów.

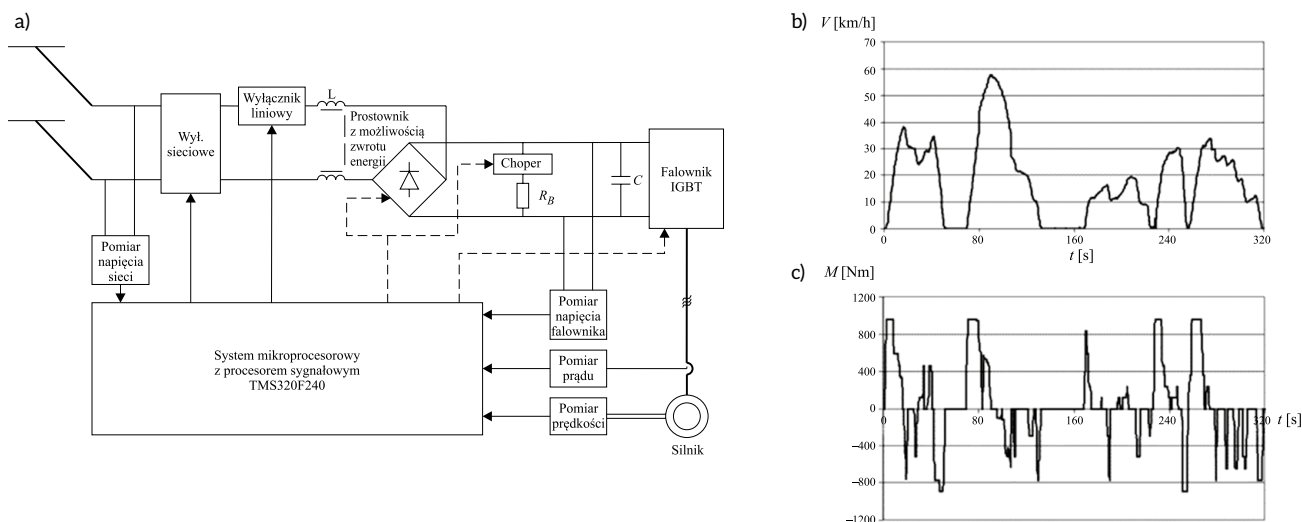
Trolejbusy to rodzaj autobusów wyposażonych w silnik elektryczny zainstalowany w nich zamiast silnika spalinowego, jeżdżących po ulicach miast na ogumionych kołach, ale mających na dachu dwa niezależne od siebie pałaki z odbierakami prądu ślizgającymi się po, w tym przypadku – podwójnych, przewodach elektrycznych sieci trakcyjnej, zawieszonych nad jezdnią tak jak w przypadku sieci tramwajowej. W napędach trolejbusów zwykle nie pojawiają się tak nieprzyjemne zjawiska, jak wspomniane

wyżej krótkotrwałe, raptowne podskoki wartości prądu roboczego. Po pierwsze, tego rodzaju pojazdy są napędzane tylko jednym silnikiem elektrycznym, ale o odpowiednio dużej mocy, więc do obwodu elektrycznego stojana zakłócenia od strony mechanicznej docierają tylko jednym torem. Po drugie zaś, koła należące do tej samej osi, znajdujące się po obu stronach pojazdu i w związku z tym mogące natrafić na różną jakość powierzchni drogi, są połączone ze sobą zawsze mechanizmem różnicowym jak w zwykłym samochodzie. Mechanizm ten, do którego dochodzi główny wał napędowy przenoszący moment obrotowy od silnika, na drodze mechanicznej dokonuje bez żadnego opóźnienia natychmiastowego podziału tego momentu pomiędzy napędzane koła

tak, że w przypadku natrafienia koła na poprzeczną przeszkodę tylko po jednej stronie pojazdu następuje od razu (zgodnie z zasadą dźwigni dwuramiennej) zmiana momentu napędowego przypadająca na drugie koło tej samej osi, a zatem nie pojawia się żaden skok w wypadkowym obciążeniu wału silnika elektrycznego.

Na rysunku 7 przedstawiono jako przykład napędu trolejbusowego asynchroniczny napęd opracowany w Politechnice Łódzkiej we współpracy z ZEP ENIKA w Łodzi, stanowiący kontynuację wcześniej opracowanego i wdrożonego falownikowego napędu tramwajowego opartego na tym samym algorytmie sterowania wektorowego prądowo zorientowanego. Jednostką napędową trolejbusu był silnik indukcyjny STDA 200 6B o mocy 165 kW, wykonany w zakładach EMIT w Żychlinie na zamówienie ZEP ENIKA. Silnik ten odpowiada gabarytami silnikowi prądu stałego o mocy 110 kW, produkowanemu przez zakłady ELMOR, stosowanemu powszechnie wcześniej w trolejbusach w Polsce [A8]. Zastosowany w tym trolejbusie falownik również ma taką samą strukturę jak falownik w napędzie tramwaju przedstawionym wcześniej. Jest zbudowany z inteligentnych modułów IGBT (tj. z rozbudowanym wewnętrznym systemem zabezpieczeń) połączonych w mostek 6T z dodatkowym tranzystorem (czoperem) umożliwiającym, podobnie jak w tramwajach, wytracanie na specjalnym rezystorze nadmiernej ilości energii elektrycznej podczas hamowania w sytuacji, gdy sieć trakcyjna nie jest w stanie jej odebrać.

Znaczącą różnicę w budowie napędu trolejbusowego i tramwajowego stanowi sposób połączenia z siecią trakcyjną. W tramwaju pantograf dotyka zawsze przewodu o tej samej polaryzacji, natomiast w trolejbusie występują dwa odbieraki prądu ślizgające się po dwuprzewodowej sieci trakcyjnej. W związku z tym na skrzyżowaniach linii trolejbusowych mogą wystąpić zwarcia pomiędzy odbierakami bądź chwilowe zamiany znaków napięcia zasilania. Układ napędowy trolejbusu musi być odporny na takie ewentualności. Aby zabezpieczyć się przed zmianą polaryzacji napięcia, wystarczy zastosować nawrotnik



Rys. 7. Falownikowy napęd asynchroniczny z wektorowym sterowaniem prądowo zorientowanym, przeznaczony do trolejbusu PR110E w Lublinie: a) schemat ideowy, b), c) przebieg prędkości trolejbusu (powyżej) i momentu napędowego silnika zadawanego przez kierowcę (poniżej), zarejestrowane w czasie jazdy ulicznej

Źródło: [A8]

mechaniczny bądź półprzewodnikowy. Nawrotniki mechaniczne są bardzo drogie ze względu na konieczność stosowania styczników potrafiących przełączać prądy rzędu setek amperów. Nawrotnik półprzewodnikowy jest tańszy i można go wykonać, stosując tzw. mostek Graetza. Niestety obecność takiego mostka uniemożliwia zwrot energii do sieci trakcyjnej, co wpływa niekorzystnie na sprawność energetyczną całego napędu. Aby można było zwracać energię do sieci, należy zastosować dodatkowe elementy półprzewodnikowe. W omawianym napędzie w nawrotniku zastosowano dodatkowo tyrystory. Ich połączenie pozwala prądowi podczas hamowania „omijać” mostek Graetza i zwracać energię do sieci. Zwracanie energii do sieci jest możliwe jednak tylko przy jednej biegunowości napięcia. Budowanie układu pozwalającego na oddawanie energii dla obu biegunowości nie jest konieczne, gdyż „przebiegunowania” występują przede wszystkim w zajezdniach i na skrzyżowaniach. Struktura złożona z mostka prostowniczego i tyrystorów nie jest jednak rozwiązaniem doskonałym. Istnieje bowiem niebezpieczeństwo, że podczas hamowania z oddawaniem energii do sieci może nastąpić zwarcie odbieraków. Zagrożenie takie występuje szczególnie podczas przejazdu przez niektóre typy skrzyżowań. Przez załączone tyrystory popłynie

wtedy prąd o dużej wartości, którego nie będzie można już wyłączyć aż do całkowitego rozładowania kondensatorów w falowniku, co z kolei doprowadza do wyłączenia napędu. Należy się przed tym zabezpieczać i umożliwić kierowcy wyłączenie hamowania odzyskowego przed wjazdem na odcinek o innej polaryzacji zasilania lub przed przejazdem przez zwarcie tak, aby nie było możliwości zainicjowania przepływu prądu w tyrystorach.

Pomimo tych dodatkowych (w porównaniu z tramwajami) utrudnień trolejbusy nadal chętnie są użytkowane w niektórych dużych miastach. Zawdzięczają to swojej zwrotności, zdecydowanie większej niż w przypadku tramwajów, dającej możliwość omijania nieoczekiwanych przeszkód pojawiających się na trasie przejazdu. Szczególnie dotyczy to obszarów o gęstej zabudowie i wysokich budynkach, gdzie ulice bywają wąskie i kręte, ale potrzebna jest sieć komunikacji miejskiej o możliwie dużej przepustowości. W takich przypadkach, przy ograniczonej możliwości naturalnej wymiany powietrza, użytkowanie zwykłych autobusów z typowym napędem spalinowym zagraża wręcz zdrowiu mieszkańców. W Polsce trolejbusy są nadal eksploatowane przez przedsiębiorstwa komunikacji miejskiej w trzech miastach: Gdyni, Lublinie i w Tychach.

Z powyższego omówienia dotyczącego trolejbusów wynika, że nawet bezpośrednie podłączenie samochodu elektrycznego przewodami do źródła energii elektrycznej nie uwalnia nas od licznych problemów związanych z bezpieczną eksploatacją takich pojazdów w ruchu miejskim. W przypadku komunikacji miejskiej dobrym, kompromisowym rozwiązaniem będzie wprowadzenie na szeroką skalę autobusów z napędem hybrydowym (ale z zakazem używania silnika spalinowego na określonych odcinkach trasy – czyli w obszarach najbardziej zagrożonych smogiem) lub autobusów wyłącznie z napędem elektrycznym, typu BEV (czyli z akumulatorem okresowo doładowywanym), co pozwoli na zachowanie czystego powietrza i uwolnienie się od już niepotrzebnej wtedy sieci trakcyjnej, w sumie przecież nie tylko niezbyt praktycznej, ale i poważnie szpecącej wygląd miasta. ■

Bibliografia dostępna pod linkiem: nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki: *Elektryczny napęd trakcyjny*, Andrzej Dębowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019



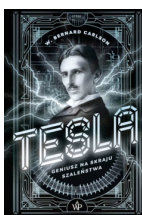
Robert Bryce
Siła energii. Elektryczność a bogactwo narodów
 Wydawnictwo Naukowe PWN
 Rok wydania: 2020

W *Sile energii* dziennikarz Robert Bryce opowiada o historii elektryczności, najważniejszej formy energii na świecie. Przez raporty na miejscu z Indii, Islandii, Libanu, Portoryko, Nowego Jorku i Kolorado autor pokazuje, jak nasze miasta, nasze bogactwo, nasze życie zależą od niezawodnych przepływów energii elektrycznej. Podkreśla rolę poza-technicznych uwarunkowań niezbędnych do udanej elektryfikacji i wyjaśnia, dlaczego tak wielu ludzi wciąż tkwi w ciemności.

Sposób, w jaki zlikwidujemy kolosalną przepaść między państwami bogatymi w energię elektryczną a w nią ubogimi, zadecyduje o naszym sukcesie w rozwiązywaniu takich problemów, jak prawa kobiet, nierówności i zmiany klimatyczne. Książka porusza także zagadnienia energetyki jądrowej, która może wytworzyć bardzo dużą ilość energii bez zanieczyszczenia środowiska.

Siła energii. Elektryczność a bogactwo narodów została napisana żywym językiem, zrozumiałym dla każdego odbiorcy.

Prezentuje całościowe spojrzenie na sytuację energetyczną na świecie, szczególnie przydatne dla osób mających wpływ na decyzje ważne dla przyszłości rynku energetycznego, ale także dla szerokiego kręgu czytelników (także studentów, uczniów) zainteresowanych tym tematem.



W. Bernard Carlson
Tesla. Geniusz na skraju szaleństwa
 Wydawnictwo Poznańskie
 Rok wydania: 2020

„Gdy Pan Tesla mówi o problemach elektrycznych, nad którymi pilnie pracuje, staje się postacią wręcz fascynującą. Z tego, co mówi, nie sposób zrozumieć ani jednego słowa”.

Nikola Tesla jest w dużej mierze jednym z twórców współczesnego świata. Przyczynił się do rewolucji elektrycznej, która całkowicie zmieniła ludzkie życie na przełomie XIX i XX wieku. Wynałazł radio, dynamo rowerowe, baterię słoneczną i widowiskowy transformator nazwany od jego nazwiska. To w dużej mierze dzięki niemu istnieje nowoczesny świat, który znamy.

Tesla był również jednym z najbardziej znanych w ówczesnej Ameryce naukowców. Dbał o swój wizerunek, udzielając wielu wywiadów, opowiadając o swoich wynalazkach i o tym, co jeszcze chciałby stworzyć. Przeprowadzał publiczne pokazy swoich wynalazków, olśniewając

widownię wykorzystywaniem prądu. Jego życie naznaczone było również konkurencją z innym wielkim umysłem tamtych czasów – Thomasem Alwem Edisonem, który wykorzystywał i opatentował pod swoim nazwiskiem wiele wynalazków genialnego Serba.

W. Bernard Carlson przygląda się Tesli nie tylko pod kątem jego osobowości, ale również szeroko opisując czasy i realia, w których wynalazca działał. Skupia się również na konkretnych wynalazkach i procesie pracy nad nimi. Pochyla się nad tym, w jaki sposób Tesla pracował, jak próbował w eksperymentalny sposób urzeczywistnić swoje idee, które wielu mogły wydawać się błędne. Opisuje, jak doprowadził do opatentowania niemal trzystu swoich wynalazków. Opierając się na oryginalnych dokumentach, wskazuje, jak Tesla potrafił przyciągać zainteresowanie publiczności, tworząc mity na swój temat i świadomie kreując swój wizerunek ekscentrycznego wizjonera, geniusza na skraju szaleństwa.



Włodzimierz Choromański, Iwona Grabarek,
 Maciej Kozłowski, Andrzej Czerepicki,
 Katarzyna Anna Marczuk
Pojazdy autonomiczne i systemy transportu autonomicznego
 Wydawnictwo Naukowe PWN
 Rok wydania: 2020

Pierwsza na polskim rynku książka o technologii rodem z XXI w. – dotycząca pojazdów autonomicznych i systemów transportu autonomicznego. Autorzy – cenieni znawcy tematu, międzynarodowi konsultanci tej nowej technologii, a zarazem wykładowcy Politechniki Warszawskiej – przedstawiają tę nowoczesną tematykę w sposób arcyciekawy, poparty ilustracjami i przykładami.

W publikacji znajdują się charakterystyki pojazdów autonomicznych o różnym poziomie autonomizacji – L3-L5 – prezentacja systemów PRT, APM czy systemów hybrydowych. Przedstawione są również technologie informatyczne (*software* i *hardware*) stosowane w tego typu pojazdach i systemach transportu, sztuczna inteligencja i głębokie maszynowe uczenie, wykorzystywane przy tej okazji, układy sensoryczne czy układy HMI (ang. *Human Machine Interface*). Znajdują się tu również niezwykle ważne informacje dotyczące problemów bezpieczeństwa systemów autonomicznych.

Książka znajdzie swoich Czytelników wśród słuchaczy studiów I, II i III stopnia oraz studiów podyplomowych na kierunkach związanych z TRANSPORTEM, MECHATRONIKĄ czy na właśnie powstających na uczelniach technicznych specjalnościach dedykowanych POJAZDOM AUTONOMICZNYM I SYSTEMOM TRANSPORTU AUTONOMICZNEGO.

Zainteresuje również inżynierów projektantów aut i systemów autonomicznych, przyszłych użytkowników tych systemów, samorządy i każdego, kogo ciekawiają najnowocześniejsze systemy transportu.

TEMATYKA

napędy i sterowanie

miesięcznik
naukowo-
-techniczny

Nr 3 (263)

Rok XXIII
Marzec 2021

- Automatyka i robotyka
- Nowe technologie
- Roboty przemysłowe
- Termowizja
- Aparatura kontrolno-pomiarowa
- Systemy mechatroniczne



Promocja pisma zgodnie z planem wydawniczym na www.nis.com.pl

Kontakt: e-mail: redakcja.nis@drukart.pl; tel. 32 755 19 17

1/2021 (261)

2/2021 (262)

3/2021 (263)

4/2021 (264)

5/2021 (265)

6/2021 (266)

7-8/2021 (267-268)

9/2021 (269)

10/2021 (270)

11/2021 (271)

12/2021 (272)

PRENUMERATA

Prenumeratę miesięcznika „Napędy i Sterowanie” można rozpocząć w dowolnym momencie. Cena prenumeraty pozostaje bez zmian, niezależnie od zmiany stawki VAT na czasopismo. Faktura za prenumeratę zostanie przesłana wraz z pierwszym zamówionym egzemplarzem. Koszty przesyłki pokrywa Wydawnictwo. Studenci oraz uczniowie mogą skorzystać z 50-proc. zniżki, przesyłając kserokopię ważnej legitymacji szkolnej. Zniżka obejmuje również szkoły i wyższe uczelnie.

Cena prenumeraty rocznej wynosi 118,80 zł (w tym 8% VAT).

Informacje na temat prenumeraty oraz numerów archiwalnych można uzyskać pod numerem tel./fax: 32 755 15 74.

Miesięcznik „Napędy i Sterowanie” można zaprenumerować, wykorzystując:

- druk zamówienia pobrany z naszej witryny internetowej, www.nis.com.pl/nis/prenumerata;
- pocztę elektroniczną, e-mail: prenumerata@drukart.pl.

lub za pośrednictwem:

- Wydawnictwa SIGMA NOT, tel./fax 22 840 35 89;
- RUCH SA, tel. 801 800 803 lub 22 693 70 00 (godz. 7⁰⁰–17⁰⁰)
www.prenumerata.ruch.com.pl, prenumerata@ruch.com.pl;
- GARMOND PRESS SA, tel./fax 12 412 75 60;
- Kolporter spółka z ograniczoną odpowiedzialnością sp.k.,
www.kolporter.com.pl, tel. 41 367 88 88.



- ◀ Aparatura kontrolno-pomiarowa
- ◀ Automatyka przemysłowa
- ◀ CAD/CAM/CAE
- ◀ Elementy i systemy hydrauliczne
- ◀ Elementy i systemy pneumatyczne
- ◀ Energoelektronika
- ◀ Napędy
- ◀ Oleje przemysłowe
- ◀ Oprogramowanie
- ◀ Robotyka
- ◀ Systemy zasilające
- ◀ Utrzymanie ruchu

Płacisz raz,
promujesz się
cały rok

NAPĘDY I STEROWANIE – KATALOG BRANŻOWY 2021

WYDANIE SIEDEMNASTE



Więcej informacji: www.nis.com.pl

napędy miesięcznik
i sterowanie naukowo-
techniczny

XV edycja Konkursu miesięcznika

napędy miesięcznik
i sterowanie naukowo-
techniczny

PRODUKT ROKU 2020

KATEGORIE:

- Nowe maszyny i technologie
- Poprawa bezpieczeństwa
- Napędy i silniki
- Systemy sterowania procesami i układami
- Urządzenia pomiarowe i czujniki



Ogłoszenie wyników konkursu oraz wręczenie nagród i wyróżnień odbędzie się podczas Międzynarodowych Targów AUTOMATICON 2021.

Więcej na www.nis.com.pl