CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 7-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

WINCENTY LOTKO, KRZYSZTOF GÓRSKI*

OCENA WYBRANYCH PARAMETRÓW PROCESU SPALANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANYM MIESZANINAMI OLEJU NAPĘDOWEGO Z ETANOLEM LUB ETEREM METYLO-TERT-BUTYLOWYM

ESTIMATION OF COMBUSTION PROCESS PARAMETERS IN A DIESEL ENGINE SUPPLIED WITH A MIXTURE OF GAS OIL AND ETHANOL OR DIMETHYL-TERT-BUTYL

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań realizowanych z użyciem silnika o zapłonie samoczynnym zasilanym olejem napędowym oraz dwoma innymi rodzajami mieszanin paliwowych, takich jak: olej napędowy–odwodniony etanol, olej napędowy–eter metylo-tert-butylowy (EMTB). Badania wykazały, że etanol lub etery mogą być wykorzystane jako dodatki tlenowe do oleju napędowego. Proces spalania takich mieszanin zależy od ich składu. Użycie etanolu lub badanego eteru w mieszaninie z olejem napędowym prowadzi do zwiększenia prędkości narastania ciśnienia w komorze spalania.

Słowa kluczowe: *silnik diesla, etanol, etery, EMTB, badania silnikowe, ekologia*

Abstract

The paper presents test results carried out with using of CI engine fuelled with diesel oil and two other kind of fuel blends, such: diesel–anhydrous ethanol and diesel–methyl tertiary butyl ether (EMTB). Research results show that ethanol or ethers can be used as oxygenates in diesel fuel. Combustion process of such fuel blends depend on mixture composition. Using of ethanol or tested ether in mixture with diesel oil follows to increase a value of maximum pressure rise in combustion chamber.

Keywords: *diesel engine, ethanol, ethers, EMTB, engine research, ecology*

* Prof. dr hab. inż. Wincenty Lotko, dr inż. Krzysztof Górski, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Silniki spalinowe, które były konstruowane na przełomie XIX i XX w. mogły być zasilane olejami pochodzenia roślinnego lub tzw. gazem świetlnym. Już w 1900 r. Rudolf Diesel podczas wystawy w Paryżu zaprezentował silnik zasilany olejem uzyskiwanym z orzechów ziemnych. Jednak od ponad stu lat podstawowym paliwem dla silników spalinowych są produkty uzyskiwane z ropy naftowej. Wydaje się, że było to spowodowane przede wszystkim jej niższą ceną w stosunku do paliw, które można było uzyskiwać z roślin. Wzrastająca podaż ropy naftowej na rynkach światowych była jednym z motorów rozwoju gospodarki światowej w pierwszej połowie XX w. Można uznać, że w tym czasie wszystkie uprzemysłowione kraje świata stały się konsumentami ropy naftowej niezależnie od tego, czy posiadały dostęp do jej złóż. Dopiero kryzys paliwowy w latach 70. w sposób dobitny pokazał, że podaż ropy naftowej może być niewystarczająca dla zachowania zrównoważonego rozwoju gospodarczego większości krajów. Utrzymujące się w tamtych latach wysokie ceny ropy naftowej skłaniały do poszukiwań alternatywnych źródeł energii, które można było wykorzystać dla potrzeb zasilania silników spalinowych. W tym sensie kryzys energetyczny był bodźcem do rozpoczęcia wielu badań nad paliwami pochodzenia roślinnego. Pomimo wielu korzyści wynikających z ich stosowania, zużycie biopaliw w dalszym ciągu stanowi niewielki procent ogólnego zapotrzebowania na paliwa silnikowe. Nadal wśród wielu barier ograniczających rozwój sektora biopaliw jako najważniejsze wskazuje się przyczyny ekonomiczne, które wynikają z określonej polityki wewnętrznej prowadzonej przez rządy poszczególnych krajów. Warto pamiętać, że ta polityka podlega wpływom grup lobbujących na rzecz lub przeciwko rozwojowi rynku biopaliw silnikowych, dlatego w skali światowej można wskazać kraje, w których stosowanie biopaliw jest popularne lub niepopularne. Więcej informacji w tym zakresie znajdzie czytelnik w komunikacie Komisji Europejskiej pt. „Strategia UE na rzecz biopaliw" [3]. Dokument ten został opublikowany na początku 2006 r. i jest ogólnodostępny w Internecie. Komisja Europejska wskazuje w nim na zasadność rozwoju biopaliw II generacji. Rozumie przez to m.in. pozyskiwanie etanolu z biomasy, szczególnie tej, która nie ma zastosowania spożywczego. Wydaje się, że jest to stanowisko uzasadnione, gdyż wykorzystanie odpadów do produkcji biopaliw silnikowych nie powinno mieć negatywnego wpływu na zmiany cen produktów spożywczych.

Aktualnie podstawowym biopaliwem dla silników o zapłonie samoczynnym są estry metylowe nienasyconych kwasów tłuszczowych (ang. *Fatty Acid Methyl Ester* FAME). W Polsce są one wytwarzane przede wszystkim z nasion rzepaku, który – wbrew obiegowym opiniom – wymaga żyznych gleb dla zapewnienia opłacalności produkcji [5]. W Europie paliwa tego rodzaju stają się coraz bardziej popularne. Jednak ograniczone możliwości ich wytwarzania wzbudzają obawy związane z możliwościami dalszego rozwoju sektora biopaliw opartego na przetwarzaniu roślin oleistych. Coraz częściej zwraca się uwagę na potencjalnie niekorzystny wpływ tego procesu na zmiany cen niektórych produktów spożywczych. Uwzględniając powyższe uwagi, korzystne wydaje się poszukiwanie innych rodzajów biopaliw, które można zastosować do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Do takich biopaliw można zaliczyć mieszaniny oleju napędowego z etanolem i/lub eterem metylo-tert-butylowym. Możliwe jest także wykorzystanie innych eterów, a także całkowite zrezygnowanie z oleju napędowego jako paliwa bazowego dla silników o zapłonie samoczynnym. W tym zakresie znane są badania prowadzone na potrzeby koncernu SCANIA. Wybrane autobusy tej firmy zostały wyposażone w silniki o zapłonie samoczyn-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

nym, w których dokonano modyfikacji polegającej m.in. zwiększeniu stopnia sprężania do wartości równej 24. Tak przygotowane silniki są zasilane mieszaniną etanolu i odpowiednio dobranych dodatków uszlachetniających. Objętościowy udział etanolu w tej mieszaninie wynosi ok. 95% (90,2% – udział masowy). Według dostępnych informacji pozostałą część mieszaniny stanowią: dodatek ułatwiający zapłon (7% – udział masowy), inhibitor korozji (ok. 125 ppm – udział masowy) oraz inne dodatki [2].

Wiele ciekawych informacji nt. wykorzystania alkoholi oraz eterów dla potrzeb zasilania silników o ZS znajdzie czytelnik w odpowiednich publikacjach [2, 4, 6, 7].

2. Cel prowadzonych badań

Mając na uwadze poszukiwanie przyjaznych dla środowiska naturalnego paliw alternatywnych, a także uwzględniając korzyści dla gospodarki krajowej wynikające z dalszego rozwoju przemysłu spirytusowego i rolnictwa, postanowiono przeprowadzić badania wstępne z zakresu zasilania silników o zapłonie samoczynnym mieszaninami oleju napędowego z etanolem lub eterem metylo-tert-butylowym.

Podczas badań starano się uzyskać podstawowe doświadczenia z zakresu oceny własności fizykochemicznych badanych mieszanin oraz ich wpływu na zmiany procesu spalania w silniku AD3.152, którego aparatura wtryskowa została wyregulowana wg danych producenta.

3. Własności fizykochemiczne badanych paliw

W badaniach zastosowano następujące rodzaje mieszanin: ET20 oraz EMTB20. Mieszanina o oznaczeniu ET20 składała się w 80% z oleju napędowego oraz 20% odwodnionego etanolu. Mieszanina EMTB20 zawierała natomiast 80% ON oraz 20% EMTB. Wszystkie podane proporcje odnoszą się do udziałów objętościowych dla poszczególnych paliw, które tworzyły mieszaninę. Wybrane własności fizykochemiczne tych mieszanin oraz oleju napędowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wybrane własności fizykochemiczne badanych paliw

Nazwa własności	Oznaczenie paliwa		
	ON	ET20	EMTB20
Gęstość w temp. 15°C [kg/m^3]	838	818	817
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C [mm/s^2]	3,49	3,08	2,95
Indeks cetanowy [–]	49,9	48,1	49,2
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,2	40,1	41,5
Wartość opałowa [MJ/dm^3]	36,2	32,8	33,9

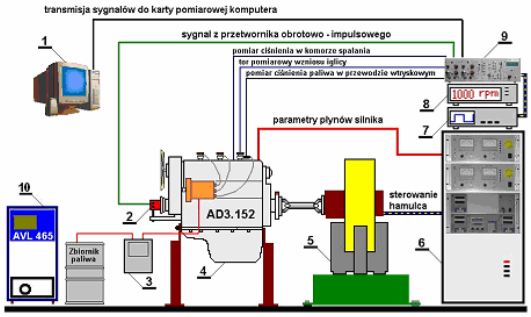
Własności fizykochemiczne mieszanin o innych proporcjach składu oleju napędowego z etanolem znajdzie czytelnik także w literaturze [1, 8].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Charakterystyka przeprowadzonych badań

4.1. Stanowisko badawcze

W prowadzonych doświadczeniach wykorzystano stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rys. 1. Obiektem badawczym był silnik AD3.152 (poz. 4, rys. 1). Połączono go z hamulcem [5] za pomocą wału przegubowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Diagram of the test stand

Regulacja obciążenia silnika, a także rejestracja jego mocy efektywnej oraz momentu obrotowego odbywały się za pomocą szafy sterowniczej – 6. Badany silnik był wyposażony w czujniki piezokwarcowe firmy AVL oraz przetwornik obrotowo-impulsowy – 2 firmy Intron z Poznania. Zastosowane czujniki w połączeniu z wzmacniaczem ładunku – 9 oraz kartą pomiarową KPCI 3110 firmy Keithley i komputerem – 1 umożliwiały rejestrację parametrów szybkozmiennych ciśnień w komorze spalania i przewodzie wtryskowym paliwa. Rozdzielczość pomiarowa prowadzonych rejestracji parametrów szybkozmiennych silnika wynosiła 0,17°OWK. Dodatkowo stanowisko badawcze było wyposażone w generator sygnału podstawy czasu – 7 oraz układ – 8 kontroli prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

4.2. Sposób realizacji badań

Badania wstępne prowadzono w warunkach ustalonych. Polegały one na rejestracji zmian ciśnienia w komorze spalania silnika zasilanego mieszaniną ET20, EMTB20 oraz porównawczo ON. Pomiary wykonywano dla ustalonego obciążenia silnika o wartości M_o = 100 Nm i dwóch prędkości obrotowych jego wału korbowego, tj. n = 1200 oraz 1600 obr./min.

W każdym punkcie pomiarowym rejestrowano 100 kolejnych cykli roboczych. Następnie w każdym z nich wyznaczono wartości następujących parametrów opisujących przebieg procesu spalania badanych paliw:

– średnie ciśnienie indykowane,
– kąt początku spalania,

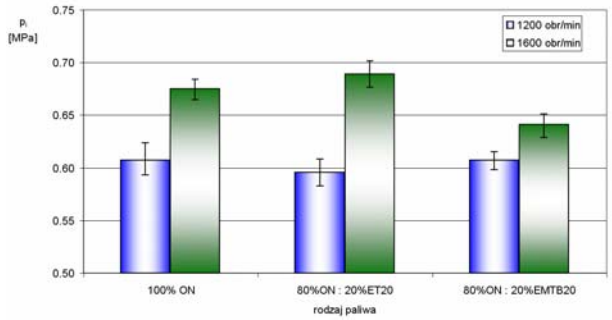
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– maksymalna wartość ciśnienia w komorze spalania,
– maksymalna prędkość narastania ciśnienia w komorze spalania,
– kąt zwłoki samozapłonu paliwa,
– kąt końca spalania paliwa.

Na podstawie obliczonych wartości wyżej wymienionych parametrów wyznaczono statystykę próby, na którą składały się wartości średnie oraz odchylenia standardowe. Tak uzyskane wyniki przedstawiono w formie rysunków zawartych w kolejnym rozdziale.

5. Wyniki badań

Badania prowadzono w takich warunkach charakterystyki obciążeniowej, dla których silnik rozwijał moment obrotowy o wartości 100 Nm przy prędkości n = 1200 oraz 1600 obr./min. Stwierdzono, że wzrost prędkości obrotowej wału korbowego od n = 1200 do n = 1600 powoduje wzrost wartości średniego ciśnienia indykowanego w zakresie 5–10%. Wydaje się, że jest to spowodowane przede wszystkim wzrostem oporów mechanicznych silnika. Obserwowana zmiana wartości średniego ciśnienia indykowanego jest także nieznacznie uzależniona od rodzaju spalanej mieszaniny paliwowej (rys. 2).



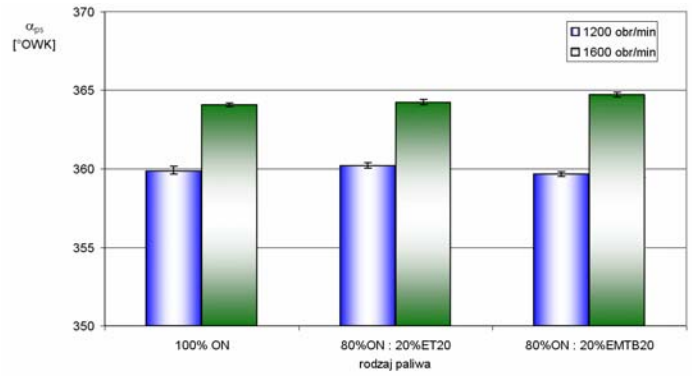
Rys. 2. Wpływ rodzaju paliwa oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika na zmiany wartości średniego ciśnienia indykowanego

Fig. 2. Effect of fuel kind and engine crankshaft rotational speed on variation of mean indicated pressure

Nie stwierdzono, aby rodzaj badanego paliwa miał wpływ na zmianę wartości położenia kątowego wału korbowego silnika, przy którym obserwowano symptomy samozapłonu (rys. 3). Zauważono jedynie, że wzrost prędkości obrotowej wału korbowego silnika spowodował zwiększenie wartości kąta początku spalania.

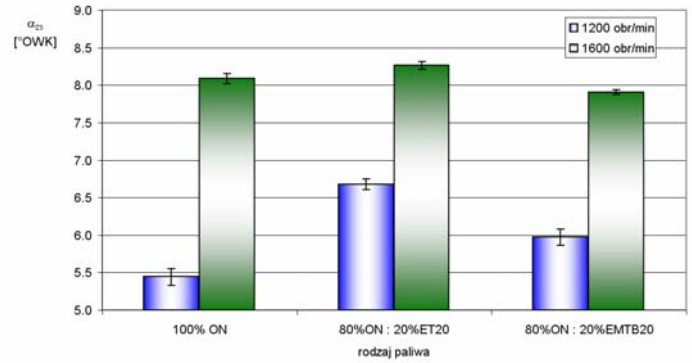
Znając wartości kątów początku spalania oraz wtrysku paliwa, wyznaczono kąty opóźnienia samozapłonu badanych mieszanin oraz ON. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4. Zauważono, że większej prędkości obrotowej wału korbowego badanego silnika odpowiadał adekwatnie większy kąt opóźnienia samozapłonu badanych paliw. Największą różnicę zaobserwowano dla ON (ok. 2,5°OWK). W przypadku pozostałych badanych paliw różnica ta nie przekraczała 2°OWK. Wpływ rodzaju badanego paliwa na zmianę kąta opóźnienia samozapłonu był widoczny jedynie przy prędkości obrotowej n = 1200 obr./min. Dla większej prędkości, tj. n = 1600 obr./min, ten wpływ zanikał.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Wpływ rodzaju paliwa oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika na zmiany wartości kąta początku spalania

Fig. 3. Effect of fuel kind and engine crankshaft rotational speed on angle variation of combustion start



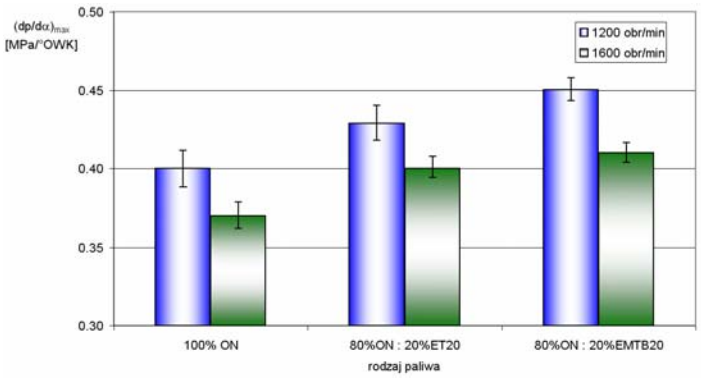
Rys. 4. Wpływ rodzaju paliwa oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika na zmiany wartości kąta zwłoki samozapłonu paliwa

Fig. 4. Effect of fuel kind and engine crankshaft rotational speed on variation of fuel self-ignition angle

Zastosowanie etanolu lub eteru w ilości 20% (v/v) w mieszaninie z ON powodowało wzrost maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w komorze spalania o ok. 12% (rys. 5). Może to oznaczać, że silnik pracujący pod maksymalnym obciążeniem, zasilany badanymi mieszaninami może pracować zbyt twardo.

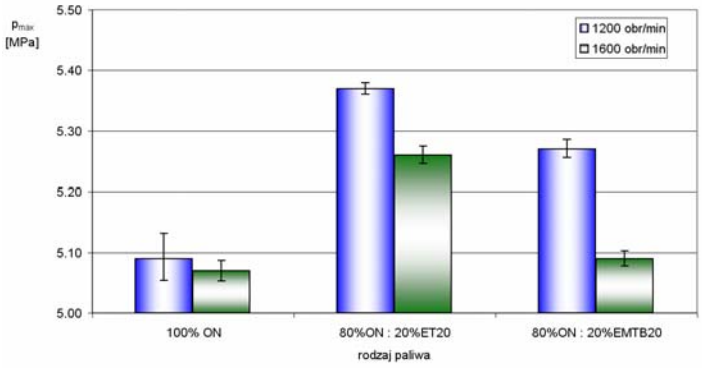
W takim przypadku należałoby dokonać odpowiedniej adaptacji parametrów regulacyjnych aparatury wtryskowej silnika dla potrzeb zasilania nowymi rodzajami paliwa. Zauważono także niewielką zmianę wartości maksymalnych ciśnień w komorze spalania, które były większe w przypadku spalania mieszanin zawierających etanol lub eter w stosunku do przypadku, w którym badany silnik zasilano wyłącznie olejem napędowym. Wzrost wartości maksymalnych ciśnień nie przekraczał 0,3 MPa (rys. 6).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Wpływ rodzaju paliwa oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika na zmiany wartości maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w komorze spalania

Fig. 5. Effect of fuel kind and engine crankshaft rotational speed on variation of maximum rate of pressure rise in combustion chamber



Rys. 6. Wpływ rodzaju paliwa oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika na zmiany wartości maksymalnego ciśnienia w komorze spalania

Fig. 6. Effect of fuel kind and engine crankshaft rotational speed on variation of maximum pressure in combustion chamber

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość zasilania silników o zapłonie samoczynnym mieszaninami ON z odwodnionym etanolem lub eterem metylo-tert-butylowym. Przeprowadzona analiza, której jednak nie zawarto w niniejszym artykule, wykazała, że rodzaj badanych mieszanin nie miał znaczącego wpływu na zmianę przebiegu procesu ich wtrysku. W efekcie początek spalania tych mieszanin w stosunku do ON zachodził przy zbliżonym położeniu kątowym wału korbowego silnika. Dalsza realizacja procesu spalania paliw ET20 oraz EMTB20 charakteryzowała się gwałtowniejszym przebiegiem w stosunku do ON. Świadczą o tym maksymalne prędkości narastania ciśnienia, które podczas spalania

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

badanych mieszanin były o ok. 12% większe w stosunku do spalania oleju napędowego. W przypadku pełnych obciążeń silnika zasilanego takimi mieszaninami może to budzić obawy ze względu na zwiększenie ryzyka wystąpienia tzw. twardej pracy silnika. Może tym samym wymusić zmianę regulacji aparatury wtryskowej w kierunku opóźnienia wtrysku paliwa. Większym prędkościom narastania ciśnienia w komorze spalania odpowiadały nieznacznie większe ciśnienia maksymalne.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń, a także dzięki analizie literatury przedmiotu wydaje się celowe ich kontynuowanie. Warto poszukiwać odpowiednich emulgatorów, które umożliwią uzyskanie stabilnych mieszanin paliwowych oleju napędowego z etanolem niezależnie od zawartości wody i zmian temperatury. Takie emulgatory powinny także sprzyjać poprawie własności smarnych paliwa oraz zwiększać ich liczbę cetanową.

Badania powinny być także realizowane z zastosowaniem eterów, które charakteryzują się korzystniejszymi w stosunku do etanolu własnościami fizykochemicznymi. Wraz ze wzrostem masy cząsteczkowej eterów obserwuje się zwiększenie ich wartości opałowej, lepkości, gęstości oraz liczby cetanowej. Ponadto etery nie są tak higroskopijne jak etanol, co jest korzystne ze względu na ograniczenie procesów korozyjnych.

Literatura

[1] Bhattacharya T.K., Mishra T.N., *Studies on Feasibility of using Lower Proof Ethanol-diesel Blends as Fuel for Compression Ignition Engines*, Journal of The Institution of Engineers (India), Vol. 84, December 2003.

[2] Nord K., *Particles and Unregulated Emissions from CI Engines Subjected to Emission Control*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden 2005.

[3] Komunikat Komisji pt. „Strategia UE na rzecz biopaliw", Bruksela 2006.

[4] Liquid Fuels Management Group Ltd., *Technical Improvements in Ethanol Fuel Blend Mixtures*, The Energy Research and Development Corporation, Australia 1994.

[5] Tys J., Piernikarski W., Jackowska I., Kaczor A., Zając G., Starobrat P., *Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku*, Acta Agrophysica, Lublin 2003.

[6] Trans Energy Consulting Ltd., *Alcohols/Ethers as Oxygantes in Diesel Fuel: Properties of Blended and Evaluation of Practical Experiences*, Report TEC 3/2005.

[7] Schieder D., *Bio-ethanol: Existing pathways*, 1st European Summer School on Renewable Motor Fuels, Germany 2005.

[8] Ajav E.A., Akingbehin O.A., *A Study of some Fuel Properties of Local Ethanol Blended With Diesel Fuel*, Agircultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, Vol. IV, March 2002.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ