

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI

Współorganizatorzy:

UNIwersytet Techniczny w Ostrawie (Czechy)

UNIwersytet Techniczny w Koszycach (Słowacja)

Instytut Problemów Stosowanych

Mechaniki i Matematyki (IPSM)

Narodowej Akademii Nauk

UNIwersytet Narodowy „Politechnika Lwowska” (UNPL)
(Ukraina)

International Scientific Seminar

***OPTIMIZATION OF THE STRUCTURES OF
MANUFACTURING PROCESSES - 2023***

Proceedings

Międzynarodowe seminarium naukowe

***OPTYMALIZACJA STRUKTUR PROCESÓW
WYTWÓRCZYCH - 2023***

Materiały



OPOLE

19 grudnia 2023

OPOLE 2023

KOMITET NAUKOWY

PRZEWODNICZĄCE:

Hachkevych O.,
Koziarska A.,
Stanik- Besler A.

CZŁONKOWIE:

Bozhenko B., Kubus M., Musii R.,
Pączko D., Terlets'kyi R., Tiszbierek A., Zator S.

KOMITET ORGANIZACYJNY:

Bozhenko B., Ivas'ko R., Koziarska A.,
Melnik N., Szylicka Z., Tiszbierek A.

JEDNOSTKI ORGANIZACYJNE:

Katedra Matematyki i Zastosowań Informatyki PO,
Wydział Teorii Pól Fizyczno-Mechanicznych IPSMM,
Katedra Matematyki Wyższej UNPL

ZAKRES TEMATYCZNY:

1. APLIKACJE NAUK PODSTAWOWYCH I UWZGLĘDNIENIE CZYNNIKÓW TOWARZYSZĄCYCH W PROCESACH WYTWÓRCZYCH
2. MODELOWANIE I OPTIMALIZACJA W PROCESACH WYTWÓRCZYCH

SEKRETARIAT SEMINARIUM:

POLITECHNIKA OPOLSKA

Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki
Katedra Matematyki i Zastosowań Informatyki
ul. Ozimska 75, 45-370, Opole
tel. 77 – 449 87 25

Wydano w formie pliku: http://www.iapmm.lviv.ua/13/dPage_OSPW/index.html

SPIS TREŚCI

REFERATY ZAMAWIANE

1. O. HACHKEVYCH, A. KOZIARSKA, A. STANIK-BESLER PROCESY WYTWÓRCZE. OSIĄGNIĘCIA I ROZWÓJ – 2023	9
2. M. KUBUS LINIOWY MODEL REGRESJI. KRYTERIUM EDC WYBORU MODELU ..	15
3. O. HACHKEVYCH, R. IVAS'KO, A. STANIK-BESLER, R. TERLETS'KYI OSOBLIWOŚCI PARAMETRÓW OKREŚLAJĄCYCH POŁĄCZONE: ELEKTROMAGNETYCZNE, CIEPLNE ORAZ MECHANICZNE W CIAŁACH FERROMAGNETYCZNYCH PRZEWODZĄCYCH PRZY QUASI-USTALONYM ODDZIAŁYWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM	23
I. APLIKACJE NAUK PODSTAWOWYCH I UWZGLĘDNIENIE CZYNNIKÓW TOWARZYSZĄCYCH W PROCESACH WYTWÓRCZYCH	
1. D. PĄCZKO LINEAR EXTENSIONS OF DYNAMICAL SYSTEMS. CONDITIONS OF REGULARITY	31
2. R. DREBOTIY, H. SHYNKARENKO, V. STELMASHCHUK AN ALGORITHM FOR SOLVING THE CAUCHY ADVECTION-REACTION PROBLEM WITH ONE REGULARIZED FINITE ELEMENT SCHEME	32
3. L. HOSHKO, Kh. DROHOMYRETSKA, P. PUKACH, A. STANIK-BESLER MODELING THE ELECTROMAGNETIC FIELD AND JOULE HEAT IN NON-FERROMAGNETIC CONDUCTING SOLIDS WITH PLANE-PARALLEL BOUNDARIES UNDER ELECTROMAGNETIC INTERACTION. TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS	33
4. B. BOZHENKO, O. HACHKEVYCH, R. KUSHNIR, R. TERLETS'KYI THERMOMECHANICS OF FERROMAGNETIC CONDUCTIVE SOLIDS UNDER QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC INTERACTION. SELECTED MATHEMATICAL PROBLEMS	35
5. O. HACHKEVYCH, R. IVAS'KO, A. KOZIARSKA, R. TERLETS'KYI PHENOMENOLOGICAL (PHYSICAL) EQUATIONS WHEN DESCRIBING THE MAGNETIZATION PROCESSES OF FERROMAGNETIC ELECTRICALLY CONDUCTING SOLIDS UNDER THE INFLUENCE OF A QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD .	36
6. O. HUMENCHUK, V. MISHCHENKO, B. CHORNYI, A. MARYNOWICZ A PROBLEM DESCRIBING THE QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD IN A FERROMAGNETIC SOLID. A METHOD FOR SOLVING IT	37

7. B. BOZHENKO, R. IVAS'KO, A. STANIK-BESLER, A. TORS'KYI A PROBLEM DESCRIBING THE THERMOMECHANICAL STATE OF A FERROMAGNETIC SOLID UNDER THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD. A SCHEME FOR SOLVING IT	38
8. A. KOZIARSKA STUDY OF RECRUITMENT-STUDENT SURVEYS COLLECTED AT THE OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN AUTUMN 2022	39
9. Z. SZYLICKA, M. WIATR, K. WOJTECZEK-LASZCZAK RESULTS OF A SURVEY CONDUCTED AFTER THE END OF THE WINTER SEMESTER 2022/23 AMONG STUDENTS OF THE OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ON MATHEMATICAL SUBJECTS: ALGEBRA AND ANALYSIS	40
10. A. TISZBIEREK APPLICATION FOR WORKING WITH TEACHING DATA. THE USE OF PROGRAMMING ENVIRONMENT TOOLS IN ITS DEVELOPMENT	41
 II. MODELOWANIE I OPTYMALIZACJA PROCESÓW WYTWÓRCZYCH	
1. B. BOZHENKO, K. GHAZARYAN, R. TERLETS'KYI, T. WÓLCZAŃSKI MODELING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MAGNETICALLY SOFT FERROMAGNETIC SOLIDS CONDUCTING ELECTRICITY UNDER THE INFLUENCE OF A QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD	45
2. L. HAYEVS'KA, A. KOZIARSKA, S. MORYŃ, R. TERLETS'KYI MODELING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MAGNETICALLY HARD FERROMAGNETIC SOLIDS CONDUCTING ELECTRICITY UNDER THE INFLUENCE OF A QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD	46
3. B. CHORNYI, O. HACHKEYVYCH, R. IVAS'KO, A. STANIK- BESLER MODELING AND DETERMINING THE THERMOMECHANICAL STATE OF THE FERROMAGNETIC CONDUCTIVE LAYER UNDER THE INFLUENCE OF A STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD	47
4. M. HACHKEYVYCH, O. HUMENCHUK, A. RAWSKA- SKOTNICZNY, B. TRISHCH PECULIARITIES OF THE THERMOMECHANICAL STATE OF A LAYER MADE OF MAGNETICALLY SOFT FERROMAGNETIC MATERIAL WITH ELECTROMAGNETIC INTERACTION	49
5. B. BOZHENKO, L. HAYEVS'KA, R. IVAS'KO, I. MAKHORKIN PECULIARITIES OF THE THERMOMECHANICAL STATE OF A LAYER MADE OF MAGNETICALLY HARD FERROMAGNETIC MATERIAL WITH ELECTROMAGNETIC INTERACTION	50
6. N. IVAS'KO, R. IVAS'KO, A. MARYNOWICZ, R. TERLETS'KYI THREE-DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC WAVES IN A METAL- COATED FERRITE PLATE. MODELLING AND QUANTITATIVE DESCRIPTION	51

7. O. HACHKEVYCH, N. IVAS'KO, R. IVAS'KO, A. STANIK-BESLER THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A MAGNETIZED FERRITE PLATE CONDITIONED BY THE INFLUENCE OF THREE- DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC WAVES	52
8. O. HACHKEVYCH, N. MELNYK, R. MUSII, M. K LAPCHUK INDUCTION SYSTEMS. MODELING AND DESCRIPTION OF ELECTRIC CURRENTS	53
9. M. HACHKEVYCH, O. HACHKEVYCH, L. HAYEV'S'KA, O. HUMENCHUK REGIMES OF THERMO-VACUUM TREATMENT OF LAMPS- REFLECTORS WITH INFRARED ELECTROMAGNETIC RADIATION. MODELING, DETERMINATION AND OPTIMIZATION	55
10. M. HACHKEVYCH, R. MUSII, R. PELEKH, I. SVIDRAK TEMPERATURE FIELDS IN SOLIDS WITH PLANE-PARALLEL EDGES IN THE PRESENCE OF HEAT SOURCES. MODELING AND DETERMINATION	56
11. A. KOZIARSKA, I. MAKHORKIN, M. MAKHORKIN SINGULAR INTEGRAL EQUATION WITH CAUCHY KERNEL WHEN MODELING THE LONGITUDINAL SHEAR OF A MULTI-WEDGE SYSTEM	58

REFERATY ZAMAWIANE



O. HACHKEYVYCH^{1,2}, A. KOZIARSKA¹, A. STANIK-BESLER¹

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

PROCESY WYTWÓRCZE. OSIĄGNIĘCIA I ROZWÓJ – 2023

Zaznaczmy na wstępie znane ogólne wymogi do teraźniejszego procesu wytwarzania, które występują już w ciągu ostatnich lat. Podstawowym zadaniem konkretnego przemysłu na danym etapie również jak w ciągu szeregu lat poprzednich pozostaje produkcja globalnie konkurencyjnych i potrzebnych wyrobów nowego pokolenia w jak najkrótszych terminach i z gwarantowanym okresem eksploatacji, oparta na formowaniu innowacyjnej ekonomii wiedzy oraz jej znaczeniu, uwarunkowanych przyspieszonym rozwojem technologii, totalną komputeryzacją i automatyzacją, globalizacją i hiperkonkurencją, a także stale przyspieszającymi się zmianami w organizacji wytwarzania. Przy tym dla rozbudowy procesów wytwórczych jednym z najważniejszych aspektów jest problem opracowania i ulepszania na podstawie ciągłego doskonalenia ich teoretycznych podstaw. Przy tym istotnym pozostaje szerokie zastosowanie metod i aplikacji nauk podstawowych, modelowania matematycznego i statystycznego oraz technik optymalizacyjnych, z jednoczesnym uwzględnieniem szeroko pojętych towarzyszących zagadnień społecznych, ekonomicznych, ekologicznych i inżynierii produkcji, w szczególności inżynierii bezpieczeństwa, przy powszechnym wykorzystaniu współczesnego komputerowego inżynieringu (dla którego charakterystycznymi cechami są multidyscyplinarność i wielobranżowość). Pewne korekty w tym wnoszą osobliwości powiązane z pandemią spowodowaną przez COVID-19 i kolejne mutacje, a również przez odrębne jak międzynarodowe, tak i ogólnopaństwowe wydarzenia.

Badania dotyczące wspomnianych dziedzin prowadzone są przez działający od początku lat dwutysięcznych w Politechnice Opolskiej (przy współpracy z naukowcami innych naukowych kolektywów, w tym obcokrajowych) zespół pracowników naukowych, zajmujący się opracowaniem i rozbudową teoretycznych podstaw organizacji i realizacji procesów wytwórczych oraz koordynacją badań w tym obszarze. Charakterystycznym dla zespołu pozostaje koncentracja na celowych badaniach naukowych, dotyczących następujących trzech, ważnych w opracowaniu teoretycznych podstaw procesów wytwórczych, uogólnionych tematycznych kierunków:

- aplikacje nauk podstawowych w procesach wytwórczych;
- modelowanie i optymalizacja w procesach wytwórczych;
- inżynieria bezpieczeństwa w procesach wytwórczych.

W zależności od specyfiki i objętości spełnionych badań w konkretnych z przytoczonych kierunków one uściślają się w pewnych latach (2009, 2010, 2015, 2022, 2023) do takich podstawowych:

2015

- aplikacje nauk podstawowych w procesach wytwórczych;
- modelowanie w procesach wytwórczych;
- optymalizacja w procesach wytwórczych.

2022-2023

- aplikacje nauk podstawowych i uwzględnienie czynników towarzyszących w procesach wytwórczych;
- modelowanie i optymalizacja w procesach wytwórczych.

W latach 2022-2023 wybrane zagadnienia trzeciego tematycznego kierunku zostały uwzględnione w dwóch pierwszych. Ta tematyka stała się mniej rozwijana w ostatnich dwóch latach w moc mniejszego zainteresowania studentów Politechniki Opolskiej różną problematyką inżynierii bezpieczeństwa.

Istotą stosowanego podejścia realizowanego przy badaniach z wymienionych wyżej kierunków tematycznych jest koncepcja rozwiązywania powyższych problemów poprzez opracowanie odpowiednich modeli matematycznych opisujących rozważane procesy i zjawiska, metod rozwiązywania sformułowanych przy tym zagadnień matematyki, fizyki i chemii oraz nauk towarzyszących, optymalizację tych procesów z uwzględnieniem eksperymentalnych i teoretycznych danych o ich istocie, a także dostosowania do wymogów wykazanych czynników społecznych, ekonomicznych, ekologicznych i inżynierii produkcji, w tym inżynierii bezpieczeństwa, zarówno w obszarze ogólnie rozumianego bezpieczeństwa pracy jak i bezpieczeństwa technicznego, powiązanych z efektywnym wytwarzaniem i kolejną realizacją i eksploatacją wyrobów przy powszechnym zastosowaniu na wszystkich etapach symulacji komputerowej.

Szczególne uwaga poświęcona była organizacji procesów wytwarzania i zarządzania działalnością oraz optymalnym funkcjonowaniem przedsiębiorstw w różnych dziedzinach przemysłu i gospodarki państwowej z uwzględnieniem spełnienia szeroko rozumianych wymogów wspomnianych problemów społecznych, ekonomicznych, ekologicznych, inżynierii produkcji, w tym bezpieczeństwa, logistyki, zarządzania, dydaktyki, opieki zdrowia – w oparciu o zasady informatyki i specjalistyczne oprogramowanie.

Celem badań, prowadzonych w przedstawionych wyżej kierunkach tematycznych, jest ogólnie mówiąc opracowanie i udoskonalenie istotnych dla praktyki inżynierskiej procesów produkcyjnych i technologii, a także racjonalnego zarządzania nimi, w sposób umożliwiający osiągnięcie zamierzonych efektów jakościowych i ilościowych przy minimalizacji kosztów – szczególnie w obszarze zużycia materiałów i energii, przy zachowaniu koniecznych czynników logistycznych oraz marketingowych.

Z analizy różnorodnych aspektów organizacji procesów wytwórczych wynika, że w tej dziedzinie w każdym roku nadal wykonywana jest znaczna ilość badań, które mają zróżnicowany charakter i wymagają uogólnienia i systematyzacji. Próbę takiego usystematyzowania wiedzy oraz udostępnienia otrzymanych

nowych danych we wspomnianych trzech obszarach tematycznych, powiązanych z wykorzystaniem wyników nauk podstawowych, modelowania i optymalizacji, a także metod dostosowania do wymogów inżynierii produkcji w połączeniu tej wiedzy z występującymi problemami społecznymi, ekonomicznymi, ekologicznymi i inżynierii produkcji, logistyki, opieki zdrowia podjęto w Politechnice Opolskiej wydaniem przez piętnaście lat następującego cyklu monografii:

1. Modelowanie i inżynieria produkcji w ekorozwoju, Red. nauk. S. Szymura, OWPO SIM z. 236 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-60691-42-7), Opole 2008.

Экологические аспекты производства и среды, Науч. ред. А. Гачкевич, OWPO SIM z. 237 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-60691-43-4), Opole 2008.

Optimization of manufacturing processes, Ed. by M. Gajek, OWPO SIM z. 238 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-60691-44-1), Opole 2008.

2. Optimization of the structures of manufacturing processes, Ed. by M. Gajek, OWPO SIM z. 256 (ISSN 1429-6063; ISBN 83-6691-69-4), Opole 2009.

3. Optimization of manufacturing processes and more environment, Ed. by M. Gajek, OWPO SIM z. 276 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-60691-96-0), Opole 2010.

Modelowanie procesów wytwórczych / Моделирование производственных процессов, Red. nauk. M. Gajek, O. Hachkevych, OWPO SIM z. 277 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-60691-99-1), Opole 2010.

4. Manufacturing processes. Some problems, Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 330 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-62736-85-0), Opole 2012.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 331 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-62736-86-7), Opole 2012.

– v. 3: Safety engineering in manufacturing processes, OWPO SIM z. 332 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-62736-87-4), Opole 2012.

5. Manufacturing processes. Actual problems – 2013, Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 364 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-37-6), Opole 2013.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 365 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-38-3), Opole 2013.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 366 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-39-0), Opole 2013.

6. Manufacturing processes. Actual problems – 2014, Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 399 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-87-1), Opole 2014.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 400 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-88-8), Opole 2014.

– v. 3: Inżynieria bezpieczeństwa w procesach wyтворческих, OWPO SIM z. 401 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-64056-89-5), Opole 2014.

7. Manufacturing processes. Actual problems – 2015, Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 426 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-24-4), Opole 2015.

– v. 2: Моделирование производственных процессов, OWPO SIM z. 427 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-25-1), Opole 2015.

– v. 3: Критериальная оптимизация в производственных процессах, OWPO SIM z. 428 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-26-8), Opole 2015.

8. Manufacturing processes. Actual problems – 2016, Ed. by: M. Gajek, O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 453 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-66-4), Opole 2016.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 454 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-67-1), Opole 2016.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 455 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-68-8), Opole 2016.

9. Manufacturing processes. Actual problems – 2017, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 472 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-93-0), Opole 2017.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 473 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-94-7), Opole 2017.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 474 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-65235-95-4), Opole 2017.

10. Manufacturing processes. Actual problems – 2018, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 492 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-22-1), Opole 2018.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 493 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-23-8), Opole 2018.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 494 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-24-5), Opole 2018.

11. Manufacturing processes. Actual problems – 2019, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 523 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-60-3), Opole 2019.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 524 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-61-0), Opole 2019.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 531 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-70-2), Opole 2020.

12. Manufacturing processes. Actual problems – 2020, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 546 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-90-0), Opole 2020.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 547 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-91-7), Opole 2020.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 548 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66033-92-4), Opole 2020.

13. Manufacturing processes. Actual problems – 2021, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications in manufacturing processes, OWPO SIM z. 562 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66903-13-5), Opole 2021.

– v. 2: Моделирование и оптимизация производственных процессов, OWPO SIM z. 563 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66903-14-2), Opole 2021.

– v. 3: Safety engineering in production processes, OWPO SIM z. 564 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66903-15-9), Opole 2021.

14. Manufacturing processes. Actual problems – 2022, Ed. by: O. Hachkevych, A. Stanik-Besler, T. Wołczański:

– v. 1: Basic science applications and consideration of related factors in manufacturing processes, OWPO SIM z. 575 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66903-30-2), Opole 2022.

– v. 2: Modeling and optimization in manufacturing processes, OWPO SIM z. 576 (ISSN 1429-6063; ISBN 978-83-66903-31-9), Opole 2022.

Monografie te na ogół wydawane są w postaci trzech lub dwóch tomów poświęconych wyodrębnionym obszarom wiedzy.

Niniejsze tematy oraz zagadnienia omawiane na seminarium przedstawiają nowe rezultaty przeprowadzonych w latach 2022-2023 badań w tych kierunkach wiedzy z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania i przenikania oraz pewnego wpływu warunków pandemii i są podane w dwóch odznaczonych wyżej tematycznych uogólnieniach.

Pierwszy rozdział zakresu tematycznego przedstawia nowe rezultaty badań dotyczące dziedziny zastosowania metod i aplikacji nauk podstawowych przy rozwiązywaniu zagadnień stosujących się opacowania wybranych aspektów teoretycznych podstaw procesów wytwórczych z uwzględnieniem czynników towarzyszących (11 tematycznych rozdz.).

W drugim rozdziale zakresu tematycznego podane są nowe wyniki badań, dotyczących modelowania matematycznego oraz optymalizacji przy opracowaniu procesów wytwórczych (12 tematycznych rozdz.).

Z przedstawionych referatów z zakresu tematycznego seminarium – które odbywa się corocznie już piętnaście lat – wynika, że charakterystyczną i ważną osobliwością obecnego etapu rozwoju procesów wytwórczych pozostaje konieczność rozwiązania wielu teoretycznych oraz praktycznych problemów wytwarzania wspólnie z występującymi jednocześnie towarzyszącymi zagadnieniami z innych dziedzin. Przy tym i nadal obserwuje się poszerzające

przenikanie analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych metod i modeli matematyki, fizyki i chemii w szczególności elementów szeroko rozumianego komputerowego inżynieringu, w różne aspekty opracowania procesów wytwórczych na podstawie głębokiego rozumienia istniejących procesów fizycznych i zjawisk, również jak czynników towarzyszących: ekonomicznych, ekologicznych, specjalistycznych technologicznych, dydaktycznych, inżynierii produkcji, logistyki, marketingu, inżynierii bezpieczeństwa, zarządzania i in. Te przenikanie pogłębia się poprzez osobliwości oddziaływania różnych niestandardowych czynników, powiązanych z pandemią i kolejnymi mutacjami oraz odrębnymi międzynarodowymi i ogólnopolskimi wydarzeniami. Odnaczona tendencja w rozwinięciu rozważanych kierunków wytwarzania (produkcji) będzie pogłębiać się i w przyszłości.

Podobnie jak w poprzednich latach rozwiązywanie omawianych złożonych zagadnień wytwarzania powiązane jest z kompleksowością takich badań naukowych, prowadzenie ich poprzez szeroki zespół specjalistów z różnych dziedzin nauki możliwe jest tylko w wyniku wszechstronnej ogólnopolskiej i międzynarodowej współpracy pomiędzy odpowiednimi jednostkami naukowymi. Potwierdzają to wyniki prowadzonych w ciągu ponad 25 lat wspólnych badań naukowców oraz procedura wydawania przez 15 lat wspólnych tematycznych monografii i kontakty specjalistów Politechniki Opolskiej w dziedzinach, powiązanych z opracowaniem różnych aspektów dotyczących procesów produkcyjnych, z polskimi i zagranicznymi ośrodkami naukowo-badawczymi: Politechniką Poznańską, Uniwersytetem Zielonogórskim, Polskim Towarzystwem Ergonomicznym w Warszawie, Instytutem Problemów Stosowanych Mechaniki i Matematyki Narodowej Ukraińskiej Akademii Nauk, Narodowymi Uniwersytetami im. Iw. Franka i „Politechniką Lwowską” we Lwowie, Uniwersytetem Technicznym w Ostrawie oraz Uniwersytetem Technicznym w Koszycach. Podane materiały są wynikiem takich wspólnych badań odrębnych z podanych kolektywów.

Materiały seminaryjne, jak również i inne z wydanego cyklu (streszczenia i materiały), przeznaczone są dla pracowników naukowych zajmujących się badaniem, projektowaniem i organizacją procesów wytwórczych. Mogą być wykorzystane przez inżynierów interesujących się aplikacjami nauk podstawowych, problemami modelowania i optymalizacji w procesach wytwórczych, a także szeroko rozumianej inżynierii bezpieczeństwa oraz innymi aspektami towarzyszącymi tym procesom, jak również przez studentów starszych lat kierunków: mechanicznych, elektrotechnicznych oraz budownictwa, inżynierii produkcji i logistyki, inżynierii bezpieczeństwa, zainteresowanych omawianymi problemami.

Odrębne z omawianych na seminarium problemów będą przedyskutowane więc dokładnie w rozdziałach wydawanych kolejnych odpowiednich tematycznych monografiach.

M. KUBUS

Opole University of Technology (Poland)

LINIOWY MODEL REGRESJI. KRYTERIUM EDC WYBORU MODELU

W zagadnieniu regresji szeroko stosowane są modele liniowe ze względu na ich prostotę oraz możliwości uogólnień. Po dołączeniu w postaci analitycznej interakcji, potęg oraz ogólnie wyrażeń, które są funkcjami oryginalnych zmiennych objaśniających, można uzyskać bogatą rodzinę modeli. Są one nadal liniowe względem parametrów co pozwala zastosować znane metody estymacji, a zarazem uwzględniają zależności nieliniowe między predyktorami a zmienną objaśnianą. Takie postępowanie zwiększa jednak liczbę parametrów do oszacowania co wymusza niejako stosowanie metod doboru zmiennych i potrzebę przyjęcia kryterium wyboru modelu. Powszechnie stosowane są tu kryteria informacyjne oraz błąd predykcji szacowany sprawdzaniem krzyżowym. Niektóre z nich implementowane są zwykle w pakietach komputerowych do analiz statystycznych. W opracowaniu rozważa się mniej znany kryterium EDC. Za pomocą symulacji komputerowych porównano je z innymi ze względu na zdolność eliminacji zmiennych nieistotnych oraz wielkość błędu predykcji. Przeprowadzone badania dla różnej liczby obiektów oraz zmiennych zakłócających przemawia na korzyść tego kryterium. Analizę przeprowadzono na metodach regresji liniowej, które w etapie estymacji parametrów modelu stanowią alternatywę dla klasycznej metody najmniejszych kwadratów.

Uwagi wstępne. Istotnym etapem budowania modelu liniowego jest jego weryfikacja. Ważną jej częścią jest dobór zmiennych, gdyż dodatkowe zmienne nieistotne lub współliniowe mogą pogarszać własności predykcyjne modelu, jak i powodować problemy z dokładnością oszacowań jego parametrów [4, 5]. W wielu praktycznych zastosowaniach brak wiedzy eksperckiej odnośnie zmiennych jakie powinny być włączone do modelu i są one dobierane wyłącznie metodami statystycznymi. Celem analizy jest często wydobywanie wiedzy z danych i wykorzystuje się metody, które robią to w sposób automatyczny. Wiele z nich jest dostępnych w pakietach do analiz statystycznych, również darmowych na licencji GNU GPL, jakim jest środowisko R. Eksploracyjna analiza danych jest stosowana coraz częściej od czasu konieczności dostępu do dużych zbiorów danych. Podkreślimy, że często nie są to dane gromadzone w wyniku zaplanowanego eksperymentu. Dlatego można przypuszczać, że występuje w nich wiele zmiennych nieistotnych, co rozumiemy jako zmienne, które nie mają wpływu na modelowane zjawisko (reprezentowane w przypadku regresji przez metryczną zmienną objaśnianą).

Zagadnienie doboru zmiennych zyskało duże zainteresowanie i zajmuje obecnie specjalną pozycję w eksploracyjnej analizie danych [4, 5]. Metody doboru zmiennych klasyfikuje się obecnie na trzy podejścia [5 i in.]. Pierwsze – to filtrowanie zmiennych, gdzie ważność predyktorów oceniana jest przed etapem budowy modelu. Drugie podejście (*wrappers*) polega na przeszukiwaniu przestrzeni podzbiorów oryginalnego zestawu zmiennych. Na tych podzbiórach budowane są modele i porównywane ze względu na kryterium jakości. Trzecie podejście polega na wykorzystaniu metod, które mają wbudowany mechanizm doboru zmiennych. Głównym problemem do rozwiązania przy stosowaniu tych metod jest wybór optymalnej wartości parametru kary. W praktyce programy komputerowe budują ciąg modeli odpowiadających różnym wartościom tego parametru oraz wybierają optymalny według ustalonego kryterium. Najczęściej implementowane są kryteria informacyjne AIC lub BIC, a także błąd predykcji estymowany sprawdzaniem krzyżowym.

Niezwykle ważnym w tym ujęciu jest problem doboru zmiennych, gdyż zwiększenie wymiaru czyni go trudniejszym przy jednoczesnym zwiększeniu możliwości modelowania zależności nieliniowych. Tak więc zadania doboru zmiennych i wyboru postaci modelu są tożsame o ile modelujemy w oryginalnej przestrzeni cech. Jeśli chcemy wprowadzać dodatkowe wyrażenia do modelu, liczba zmiennych (a więc także parametrów modelu) rośnie. W nowej przestrzeni zagadnienia te są nadal równoważne, w oryginalnej już nie. Podejście polegające na uogólnianiu modeli liniowych może prowadzić do dość dużego wzrostu wymiaru przestrzeni cech. Wystarczy np. wprowadzić wszystkie możliwe interakcje dwóch zmiennych. Stąd nawet w zastosowaniach, gdzie liczba zmiennych objaśniających nie jest duża zagadnienie doboru zmiennych może okazać się ważne, a zarazem wymagające.

Estymacja parametrów liniowego modelu regresji. W zagadnieniu regresji mamy następującą strukturę danych wejściowych. Dany jest wektor zmiennych objaśniających $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_p)$ oraz zmienna objaśniana Y przyjmująca wartości ze zbioru liczb rzeczywistych. Jest zatem dany N -elementowy zbiór wielowymiarowych obserwacji:

$$\{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_N, y_N) : \mathbf{x}_i \in \mathbf{X} = (X_1, \dots, X_p), y_i \in Y, i \in \{1, \dots, N\}\}, \quad (1)$$

lub inaczej mówiąc macierz blokowa $[\mathbf{X}|\mathbf{Y}]$, o ile dodatkowo założymy, że zmienne objaśniające są ilościowe. Zadaniem regresji jest wymodelowanie zależności $Y = f(X_1, \dots, X_p) + \varepsilon$, gdzie ε jest błędem losowym. Model wykorzystuje się najczęściej do przewidywania wartości zmiennej Y dla nowych obiektów, które dopiero będą zaobserwowane. Nieraz korzystna jest też możliwość interpretacji modelu. Najprostszą postacią takiej zależności jest funkcja liniowa wielu zmiennych:

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_p x_p + e_i, \quad (2)$$

której parametry estymowane są wyłącznie na podstawie obserwacji ze zbioru (1). Przy założeniach, że:

- składniki losowe dla każdego i mają rozkład normalny z wartością oczekiwaną równą zero,
- składniki losowe dla każdego i mają jednakowe wariancje,
- składniki losowe są od siebie niezależne,
- składniki losowe są niezależne od zmiennych objaśniających,
- między zmiennymi objaśniającymi nie zachodzą liniowe zależności

klasyczna metoda najmniejszych kwadratów daje nieobciążone estymatory parametrów modelu, które można wyrazić wzorem macierzowym:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y}. \quad (3)$$

Podkreślmy, że dla modelu z wyrazem wolnym (2), do macierzy \mathbf{X} dołączana jest (jako pierwsza) kolumna jedynek. Można udowodnić [10], że estymatory metody najmniejszych kwadratów (3) mają najmniejsze wariancje w klasie estymatorów nieobciążonych.

O ile w klasycznej metodzie najmniejszych kwadratów minimalizowany jest błąd średniokwadratowy, to w metodach estymacji wykorzystujących regularyzację [3, 6, 8, 11, 12 i in.] minimalizacji podlega wyrażenie, które jest sumą kwadratowej funkcji straty oraz komponentu kary (*penalty component*). Kryterium można tu wyrazić następująco:

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min_{\mathbf{b}} \left(\sum_{i=1}^N \left(y_i - b_0 - \sum_{j=1}^p b_j x_{ij} \right)^2 + P(\lambda, \mathbf{b}) \right). \quad (4)$$

Zaproponowane w literaturze metody różnią się postacią komponentu kary oraz, co za tym idzie, sposobem rozwiązania problemu optymalizacji. Takimi w szczególności znane są: 1) regresja grzbietowa; 2) estymator LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) zaproponowany przez Tibshiraniego [11]; 3) metoda zaproponowana przez Zou oraz Hastie [12] i nazwana elastyczną siecią (elastic net), gdzie komponentem kary występuje kombinacją liniową dwóch powyższych metod.

Spośród trzech przedstawionych sposobów regularyzacji, tylko regresja grzbietowa ma rozwiązanie w zamkniętej postaci:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{y}. \quad (5)$$

Dwie kolejne formuły regularyzacyjne wymagają zastosowania numerycznych metod przybliżonych. Estymacja w metodzie LASSO zdefiniowana jest jako problem programowania kwadratowego z liniowymi ograniczeniami. Jednak zdecydowanie szerszą popularność zyskała procedura przybliżona LARS [3]. Jest ona implementowana w komputerowych pakietach do analiz statystycznych, na przykład w programie R. W algorytmie LARS (*Least Angel Regression*) zmienne włączane są do modelu po jednej w każdym obiegu pętli. Wraz z tym modyfikowane są współczynniki modelu liniowego. Kryterium wprowadzania zmiennych wykorzystuje korelacje. W każdym kroku modyfikowane są także residua, zatem model na bieżąco dopasowywany jest do aktualnych reszt. Oznacza to w praktyce, że kolejno wprowadzane zmienne mają na celu wyjaśnić dotychczas nie opisaną przez model zmienność zmiennej objaśnianej. Dokładny

opis tego algorytmu w języku polskim można znaleźć w pracy [8]. Zwróćmy uwagę, że algorytm wymaga tylko tyle kroków ile parametrów ma model (nie licząc wyrazu wolnego). Dlatego LARS odznacza się szybkością działania.

Kryteria wyboru modelu. Jakość modelu zwykle jest definiowana jako zdolność generalizacji, co oznacza dokładność przewidywania dla przyszłych obiektów, a więc takich, których nie ma w zbiorze uczącym na etapie budowania modelu. Powszechnie znany jest fakt, że estymacja błędu predykcji, na przykład błędem średniokwadratowym, na obserwacjach zbioru uczącego daje obraz zbyt optymistyczny, gdyż model został skonstruowany tak, by być jak najlepiej dopasowany do tych danych. Z tego wynika, że takie miary jak współczynnik determinacji R^2 nie powinny być wykorzystywane jako kryteria wyboru postaci modelu. W literaturze przedmiotu można znaleźć szereg propozycji rozwiązania tego problemu, które można podzielić na dwa główne podejścia. W pierwszym podejściu wprowadzona jest minimizacja kryteriów wyboru postaci modelu w szczególności błędu predykcji. Tutaj są znane rząd kryteriów w tym kryteria informacyjne (*IC information criterion*).

Kryteria informacyjne jakie można znaleźć w literaturze przedmiotu różnią się postacią komponentu kary. Ich przegląd można znaleźć w pracy Kundu i Murali [9]. Najbardziej popularne są kryterium Akaike AIC ze stałym komponentem kary $P(N) = 2$ oraz Bayesowskie kryterium informacyjne BIC z komponentem kary $P(N) = \log(N)$. Bardziej ogólną formułę $P(N)$ zaproponowali Bai i in. [1 i in.]. W ich kryterium EDC komponent kary powinien spełniać warunki:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P(N)}{N} = 0 \quad \text{oraz} \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P(N)}{\log \log N} = \infty. \quad (6)$$

Przykładem takiego komponentu kary może być $P(N) = \sqrt{N}$. W pracy [9] pokazano empirycznie, że kryterium to bardzo radykalnie redukuje liczbę parametrów modelu. Może więc znaleźć zastosowanie w problemach wysokowymiarowych. Zauważmy też, że kryterium BIC jest szczególnym przypadkiem kryterium EDC, gdyż logarytm liczby obserwacji spełnia warunki granic z formuły (6). Warto także wspomnieć zmodyfikowaną postać kryterium Akaike jaką zaproponowali Hurvich oraz Tsai [7]:

$$AICc = AIC + \frac{2k(k+1)}{N-k-1}. \quad (7)$$

Jest ona rekomendowana przede wszystkim w przypadku małej liczby obserwacji w zbiorze uczącym lub małej liczby obserwacji w stosunku do liczby zmiennych.

Wspomniemy tu o jeszcze jednym kryterium nazywanym statystyką Mallowsa C_p :

$$C_p(k) = \frac{RSS}{\hat{\sigma}^2} + 2(k+1) - N, \quad (8)$$

gdzie RSS (*residual sum of squares*) oznacza resztową sumę kwadratów, a $P(N)$ jest funkcją, która decyduje o rozmiarze kary za liczbę parametrów. Ta statystyka nieraz implementowana w pakietach do analiz statystycznych (np. w pakietach programu R dedykowanych regularyzowanej regresji liniowej).

W drugim podejściu do problemu wyboru postaci modelu wykorzystuje się miarę błędu (np. błąd średniokwadratowy), przy czym nie może ona być estymowana na danych, które brały udział w etapie uczenia. Trzeba zatem mieć osobny zbiór danych nazywany zbiorem walidacyjnym, który pochodziłby z tego samego rozkładu co zbiór uczący. Oczywiście w takim zbiorze powinniśmy znać wartości zmiennej objaśnianej. Częściej zamiast pojedynczego zbioru walidacyjnego wykorzystuje się sprawdzanie krzyżowe. Rekomendowana liczba części, na które dzielony jest zbiór uczący w tej metodzie to od 5 do 10 [2 i in.]. Tu należy podkreślić, że do oceny jakości modelu końcowego, a więc tego z wybranymi przez walidację krzyżową parametrami, powinniśmy mieć dostęp do niezależnego zbioru testowego. W przeciwnym razie nasza ocena będzie obciążona [6 i in.]. Zamiast sprawdzania krzyżowego można wykorzystać także metodę bootstrapową. Dodatkową opcją eliminacji zmiennych jest reguła jednego błędu standardowego. Polega ona na utworzeniu ciągu modeli zagnieżdżonych z wzrastającą liczbą zmiennych objaśniających. Zamiast wybrać jako model końcowy ten, który ma najmniejszy błąd predykcji estymowany sprawdzaniem krzyżowym, wybiera się model z mniejszą liczbą parametrów mimo niewielkiego wzrostu błędu. Chodzi o to by błąd nie wzrósł więcej niż błąd standardowy oszacowania minimalnego błędu. W ten sposób za cenę niewielkiego wzrostu błędu predykcji można nie tylko uzyskać model prostszy, a więc wygodniejszy w interpretacji, ale także uniknąć nadmiernego dopasowania do danych (*overfitting*).

Badania z użyciem symulacji. Za pomocą symulacji modeli liniowych z wprowadzanymi zmiennymi zakłócającymi (*noisy variables*) porównano zachowanie kryteriów informacyjnych oraz sprawdzono jak na ich tle wygląda zastosowanie sprawdzania krzyżowego. Metody wyboru postaci modelu oceniane były według trzech kryteriów: błąd predykcji estymowany na zbiorze testowym, liczba zmiennych zakłócających wprowadzana do modelu oraz czas obliczeń. Do modelu liniowego z dziesięcioma zmiennymi objaśniającymi wprowadzane były dwa rodzaje zmiennych zakłócających. Po pierwsze zmienne nieistotne, tzn. takie które nie mają wpływu na zmienną objaśnianą Y . Po drugie zmienne wywołujące niekorzystne zjawisko współliniowości [4, 10]. Te były generowane według formuły:

$$x_{5+k*5} = a_{k1}x_{1+k*5} + a_{k2}x_{2+k*5} + a_{k3}x_{3+k*5} + a_{k4}x_{4+k*5} + e_k, \quad (9)$$

gdzie $k \in \{0, 1, \dots, p/5 - 1\}$ oraz p jest liczbą zmiennych (tzn. oryginalnych z modelu oraz wprowadzonych). Zatem współliniowość była wprowadzana zarówno wśród zmiennych nieistotnych jak i dla zmiennych z modelu (czyli dla $k = 0$ oraz $k = 1$). Wszystkie współczynniki, zarówno z modelu jak i zależności (9) losowane były ze standaryzowanego rozkładu normalnego. Również

realizacje zmiennych losowane były z tego rozkładu, oczywiście za wyjątkiem tych numerowanych wielokrotnością piątki, które są współliniowe. Składniki losowe w modelu oraz w regule współliniowości (9) były zróżnicowane ze względu na odchylenie standardowe. Mianowicie będą miały rozkłady normalne z wartością oczekiwaną równą zero oraz odchyleniem standardowym zmiennych (odpowiednio y lub x_{j+k*5}) mnożonym przez liczbę losowo dobieraną ze zbioru $\{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$. Porównano 7 kryteriów wyboru modelu liniowego. Były to kryteria informacyjne AIC, AICc, BIC oraz EDC, statystyka Mallowsa C_p , błąd średniokwadratowy estymowany metodą 10-cio częściowego sprawdzania krzyżowego oraz modyfikacja poprzedniego kryterium uwzględniająca regułę jednego błędu standardowego.

Wszystkie obliczenia zostały wykonane w programie R, gdzie oprócz gotowych funkcji wykorzystano opracowania własne.

Wnioski. 1. Metody doboru zmiennych są przedmiotem intensywnych badań w ostatnich dwóch dekadach. Zapotrzebowanie na nie wypłynęło z gromadzonych dużych baz danych, możliwości ich zakupu od firm wyspecjalizowanych w tej działalności, a także z ciągle rosnącej mocy obliczeniowej powszechnie dostępnych komputerów. Wśród metod doboru zmiennych poczesną rolę zajmują metody regularyzowanej regresji liniowej, gdyż ważność zmiennych jest oceniana w kontekście struktury modelu oraz w kontekście innych zmiennych. Powszechnie uważa się też, że są mniej skłonne do niekorzystnego zjawiska nadmiernego dopasowania do danych niż lepiej znane metody podejścia *wrappers*. Są też mniej kosztowne obliczeniowo, nawet od metod przeszukiwania wykorzystujących strategię zachłanną (*greedy search*), jak na przykład w popularnej regresji krokowej. Ważnym punktem w stosowaniu regularyzowanej regresji liniowej jest ustalenie wartości parametru kary. Od tego zależy w dużym stopniu skuteczność uzyskanych w ten sposób modeli. Oczywistym rozwiązaniem jest zastosowanie, któregoś ze znanych kryteriów wyboru modelu, do czego zresztą użytkownik programu komputerowego do analiz statystycznych ma dostęp. Problem w tym, że zaimplementowane w programach kryteria nie zawsze gwarantują wybór modelu optymalnego.

2. W przeprowadzonych badaniach pokazano, że mniej znane i w ogóle nie rozpowszechnione w programach komputerowych do analiz statystycznych kryterium EDC jest warte poświęcenia więcej uwagi. Po pierwsze zdecydowanie najlepiej eliminuje zmienne nieistotne w porównaniu do sześciu konkurencyjnych kryteriów. Taki rezultat otrzymano niezależnie od ustawień liczby obiektów oraz liczby zmiennych nieistotnych w przeprowadzonych symulacjach. Po drugie, EDC zwraca nie większe błędy predykcji od pozostałych kryteriów, przy czym w sytuacjach dużej liczby zmiennych nieistotnych (lub relatywnie dużej w stosunku do liczby obiektów) testy post-hoc pokazały, że błędy predykcji są istotnie mniejsze od niektórych kryteriów. Analizę istotności statystycznej przeprowadzono na poziomie 0,05. W stosunku do sprawdzania krzyżowego zastosowanie kryterium EDC jest wielokrotnie szybsze. Podk-

reślmy jeszcze raz, że kryterium BIC, które w niektórych symulacjach dawało zadawalające rezultaty, jest szczególnym przypadkiem EDC, które stosowaliśmy z pierwiastkiem kwadratowym. Przedstawione wnioski są ważne z uwagi na fakt, że w programie R funkcje realizujące regresję regularyzowaną mają zaimplementowane statystykę Mallowsa oraz sprawdzanie krzyżowe.

LITERATURA

- [1] BAI Z.D., KRISHNAIAH P.R., ZHAO L.C.: On the detection of the number of signals in the presence of white noise, *J. Multivariate Anal.* 20, p.1-25, 1986.
- [2] BREIMAN L., SPECTOR P.: Submodel selection and evaluation in regression: the X-random case, *International Statistical Review* 60: p.291–319, 1992.
- [3] EFRON B., HASTIE T., JOHNSTONE I., TIBSHIRANI R.: Least Angle Regression, *Annals of Statistics* 32 (2): p. 407–499, 2004.
- [4] GRABIŃSKI T., WYDYMUS S., ZELIAŚ A.: *Metody doboru zmiennych w modelach ekonometrycznych*, PWN, Warszawa, 1982.
- [5] GUYON I., GUNN S., NIKRAVESH M., ZADEH L. (Eds.): *Feature Extraction: Foundations and Applications*, Springer, New York, 2006.
- [6] HASTIE T., TIBSHIRANI R., FRIEDMAN J.: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd edition, Springer, New York, 2009.
- [7] HURVICH C. M., TSAI C.-L.: Regression and time series model selection in small samples, *Biometrika*, 76: p.297–307, 1989.
- [8] KUBUS M.: *Analiza metody LARS w problemie selekcji zmiennych w regresji*. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Taksonomia 18, Klasyfikacja i analiza danych - teoria i zastosowania 176, 408-416, 2011.
- [9] KUNDU D., MURALI G.: Model selection in linear regression, *Computational Statistics & Data Analysis* 22, p.461-469, 1996.
- [10] MADDALA G.S.: *Ekonometria*, PWN, Warszawa, 2008.
- [11] TIBSHIRANI R.: Regression shrinkage and selection via the lasso, *J.Royal. Statist. Soc. B.*, 58: p. 267-288, 1996.
- [12] ZOU H., HASTIE T.: Regularization and variable selection via the elastic net, *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 67(2): p. 301–320, 2005.

O. HACHKEYVYCH^{1,2}, R. IVAS'KO¹, A. STANIK-BESLER²,
R. TERLETS'KYI¹

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

**OSOBLIWOŚCI PARAMETRÓW OKREŚLAJĄCYCH POLA
POŁĄCZONE: ELEKTROMAGNETYCZNE, CIEPLNE ORAZ
MECHANICZNE W CIAŁACH FERROMAGNETYCZNYCH
PRZEWODZĄCYCH PRZY QUASI-USTALONYM ODDZIAŁYWANIU
ELEKTROMAGNETYCZNYM**

Na podstawie znanych rozwiązań zagadnień o modelowaniu, wyznaczaniu i optymalizacji pól połączonych: elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych w ciałach ferromagnetycznych (magnetycznie miękkich i twardych) przewodzących elektryczność przy oddziaływaniu zewnętrznego quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego (QUPEM) oraz wybranych rezultatów, dotyczących tej problematyki, podanych w pracach [1–16], ustalono pewne prawidłowości zależności parametrów określających rozważane pola połączone od charakterystyk materiału i parametrów zewnętrznego oddziaływania QUPEM, otrzymano odrębne uogólnienia w formułowaniu zagadnień wyjściowych w tym przybliżeniu o wyznaczaniu parametrów rozpatrywanych pól, a również omówiono kierunki dalszych badań w tej problematyce.

Podstawowe prawidłowości:

1. Nieliniowa zależność między indukcją a natężeniem pola magnetycznego powoduje istnienie dodatkowego widma nieparzystych harmonik parametrów PEM, które mają pewien wpływ na charakter rozkładów i wielkości temperatury i naprężeń.
2. Dla ciał z materiałów ferromagnetycznych parametr zastępczej głębokości wnikania PEM zmniejsza się około $\sqrt{\mu_{e*}}$ razy w porównaniu z analogicznym parametrem dla ciała z materiału niemagnetycznego równoważnego, czego efektem jest wzmocnienie zjawiska naskórkowości.
3. Wraz ze zwiększeniem wartości amplitudy natężenia pola magnetycznego na powierzchni szybkość zanikania natężenia oraz indukcji pola magnetycznego względem grubościowej współrzędnej zmniejsza się, tzn. rozkłady stają się bardziej „głębinowymi”.

4. Przy $\mu_{\varepsilon^*} > 100$ siły Ampere'a \vec{F}_{*A} są znikomo małe w porównaniu z siłami \vec{F}_{*M} (siły oddziaływania na dipola magnetycznie i prądy molekularne). Przy $\mu_{\varepsilon^*} \rightarrow 1$ wartość siły Ampere'a dąży do wartości siły dla ciała z materiału niemagnetycznego, a \vec{F}_{*M} – do zera.
5. W ciałach ferromagnetycznych (jak również w magnetycznych liniowych i niemagnetycznych) mają miejsce zjawiska rezonansowe, powodujące wysokie poziomy temperatury i naprężeń, powstałych na skutek oddziaływania prawie okresowych w czasie składowych produkcji cieplnej i sił ponderomotorycznych w otoczeniu pewnych (rezonansowych) częstości PEM. Przy tym wpływ sił ponderomotorycznych na efekty rezonansowe jest decydującym, tzn. przy ilościowym opisanu tych efektów, ciepła można nie uwzględniać. Każda z częstości rezonansowych PEM równa jest połowie odpowiedniej częstości własnej drgań termosprężystych dzielonej przez k ($k = \overline{1, \infty}$). Dla metalowych ciał ferromagnetycznych (których współczynnik ε_{*1} sprzężenia pól odkształceń i temperatury ma wartość $\varepsilon_{*1} \leq 0,02 \ll 1$), częstości rezonansowe PEM równe są połowie odpowiedniej częstości własnej badanego ciała podzielonej przez k . Zatem mogą one być wyznaczone na podstawie rozwiązania zagadnienia brzegowego dotyczącego częstości własnych drgań ciała.
6. Nieliniowa zależność między indukcją i natężeniem pola magnetycznego prowadzi do istnienia dodatkowych (w porównaniu z ciałem z materiału nieferromagnetycznego) widm częstości rezonansowych PEM $\omega_{nk} = \omega_{n1}/k$, $k = 2, \infty$, gdzie $\omega_{n1} \equiv \omega_n$ – odpowiednie częstości rezonansowe dla ciała nieferromagnetycznego. Wartości amplitud dla prawie okresowych składowych temperatury i naprężeń przy $\omega \in \{\omega_{nk} \pm \Delta\omega_{nk}\}$ zależą również od wartości χ_0 , gdzie $\chi_0 = \frac{H_c}{H_{\max}}$ przy $H_0 \leq H_{\max}$ i $\chi_0 = \frac{H_c}{H_0}$ przy $H_0 > H_{\max}$; μ_p – początkowa względna przenikalność magnetyczna materiału; H_c – koercyjna siła (natężenie powściągające); H_{\max} – charakterystyczna wartość natężenia pola magnetycznego przy namagnesowaniu nasyconym; H_0 – maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego w rozważanym punkcie (wartość amplitudy).
- I tak np. dla wybranego stopu przy częstości $\omega = \omega_{11}$ (równej pierwszej częstości rezonansowej) wartość temperatury $T = 750^\circ\text{C}$ dla $\chi_0 = 0,23$ jest osiągnięta przy $H_0 = 175\text{Am}^{-1}$, a dla $\chi_0 = 0$ – przy $H_0 = 169\text{Am}^{-1}$. Jeśli

dana częstość PEM znajduje się poza otoczeniem rezonansowym, to stan termosprężysty ciała przy $\mu_{\varepsilon^*} < 30$ określa się podobnie jak dla ciała z materiału nieferromagnetycznego tylko przez uśrednione w okresie f_* ciepło Joule'a.

7. Przy $\mu_{\varepsilon^*} > 30$ naprężenia quasi-statyczne $\hat{\sigma}^{(1)}$, spowodowane mało zmieniającymi się w czasie składowymi siły ponderomotorycznej, są porównywalne z analogicznymi naprężeniami wytworzonymi przez ciepło Joule'a i ciepło powstałe na skutek przemagnesowania cyklicznego.
8. Uwzględnienie pętli histerezy prowadzi do zmiany rozkładów amplitud: natężeń pól magnetycznego i elektrycznego, indukcji pola magnetycznego oraz ciepła Joule'a i sił ponderomotorycznych. Parametr zastępczej głębokości wnikania tych wielkości zmniejsza się $\sqrt{1 + \chi_0}$ razy w porównaniu z tym samym parametrem dla ciała z materiału magnetycznie miękkiego równoważnego.
9. Produkcja ciepła składa się z ciepła Joule'a i ciepła spowodowanego cyklicznym przemagnesowaniem (ciepła histerezy). Maksymalna wartość ciepła histerezy przy $\chi_0 \geq 0,05$ jest porównywalna z analogiczną wartością dla ciepła Joule'a. Dla warstwy ze stopu specjalnego ($\chi_0 = 0,23$) stanowi ona w przybliżeniu 30% ciepła Joule'a.
10. Otoczenia rezonansowe $\Delta\omega_{nk}$ dla ciał z materiałów ferromagnetycznych mają znacznie większy promień niż te same otoczenia dla ciał z materiałów nieferromagnetycznych ($\Delta\omega_{nk} \leq 0,01\mu_{\varepsilon^*}^2\omega_{nk}$). Otoczenia te dla ciała z materiału magnetycznie twardego zależą również od χ_0 . Wartości ich zmniejszają się w przybliżeniu o 10% w porównaniu z podobnymi wartościami dla ciała z materiału magnetycznie miękkiego równoważnego.
11. Z porównania rozwiązań wybranych zagadnień otrzymanych metodami iteracji, zaburzeń (metodą małego parametru) oraz numeryczną A-stabilną metodą typu Rungego-Kutty czwartego rzędu (z wykorzystaniem ułamków łańcuchowych) otrzymano, że z wystarczającą dla praktyki dokładnością do obliczeń charakterystyk PEM wystarczą dwie iteracje. Dokładność wyników wzrasta wraz ze zwiększaniem się parametru głębokości wnikania δ_* prądów indukcyjnych [6, 7, 12 i in.].

Schemat przybliżonego rozwiązywania. Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników, schemat przybliżonego obliczania temperatury i naprężeń w ciałach przewodzących ferromagnetycznych można sformułować w trzech etapach:

1. Znajdujemy parametry określające PEM, siły ponderomotoryczne i mało zmieniającą się w okresie drgań elektromagnetycznych gęstość ciepła – zarówno Joule'a jak i spowodowanego przemagnesowaniem cyklicznym (przy $\chi_0 \geq 0,05$).

2. Rozwiązując odpowiednie zagadnienie brzegowe na częstości własne drgań rozważanego ciała wyznaczamy częstości i otoczenia rezonansowe PEM (ω_{nk} i $\Delta\omega_{nk} \approx 0,01\mu_{\varepsilon^*}\omega_{nk}$).
3. Poszukujemy pola temperatury i naprężeń. Jeżeli przy tym częstość PEM nie mieści się w otoczeniach rezonansowych $\Delta\omega_{nk}$, to stan termosprężysty ciała wyznaczamy z zagadnienia quasi-statycznego termosprężystości, uwzględniając jedynie mało zmieniające się w czasie składowe produkcji ciepłej i sił ponderomotorycznych. Przy $\mu_{\varepsilon^*} < 30$ pomijamy siły ponderomotoryczne, a przy $\chi_0 \leq 0,05$ – również ciepło powstałe na skutek przemagnesowania. Jeżeli częstość ω jest bliska częstości rezonansowej ($\omega \in \{\omega_{nk} \pm \Delta\omega_{nk}\}$), to pola temperatury i naprężeń określamy z quasi-ustalonego przybliżenia dla sprzężonego dynamicznego zagadnienia termosprężystości, uwzględniając tylko prawie okresowe w czasie składowe sił ponderomotorycznych. Wówczas dla $\mu_{\varepsilon^*} > 30$ można praktycznie pominąć siłę Ampere’a jako małą w porównaniu z siłą „magnetyczną”, działającą na dipola magnetyczne oraz prądy molekularne.

Zaproponowany schemat obliczeniowy pozwala na sformułowanie i badanie zagadnień na wyznaczanie stanu termosprężystego ciał przewodzących ferromagnetycznych dla innych niż rozpatrywane rozkładów prądów indukcyjnych oraz dla ciał o bardziej złożonej geometrii.

Zauważmy, że występujące w tym referacie wielkości określone są w [5].

Istotne dalsze kierunki badań. Rozważane problemy związane z oddziaływaniem PEM na ośrodki przewodzące są złożone i trudne do teoretycznego ujęcia. Pominięcie prawie okresowych składowych gęstości ciepła i sił ponderomotorycznych (jak to uczyniono przy rozwiązywaniu zagadnień nagrzewania indukcyjnego ciał niedielektrycznych nieferromagnetycznych) znacznie upraszcza procedurę poszukiwania rozwiązań ale nie pozwala na oszacowanie parametrów rozważanych procesów w ciałach magnesujących się i polaryzujących się oraz przy zjawiskach rezonansowych.

Prezentowane obecnie w literaturze bardziej rozbudowane modele w większości nie są doprowadzone do postaci nadającej się do praktycznego wykorzystania. Wynika to głównie z faktu, że parametry rozważanych procesów opisują się za pomocą złożonych układów równań fizyki matematycznej, zawierających różne typy równań cząstkowych. Rozwiązanie takich układów jest trudne nawet na komputerach współczesnej generacji. Badania eksperymentalne w dziedzinie pól połączonych, a w szczególności związane z określeniem charakterystyk materiałowych i współczynników sprzężenia pól są bardzo złożone, a ich dokładność jest stosunkowo niewielka. Wydaje się, że przedstawiony model może być przydatnym w praktyce modelem matematycznym, służącym do oceny stanu termosprężystego ciał stałych przy oddziaływaniu QUPEM. Zaproponowany w pracy model uwzględnia główne czynniki oddziaływania

PEM na środowisko, a w szczególności produkcję ciepłą i siły ponderomotoryczne wytworzone przez pole w magnesującym się continuum materiałowym. Pominięcie w modelu pewnych składników wiąże się z wyeliminowaniem tych efektów, których wpływ na termomechaniczne zachowanie się ciał magnesujących się jak i niemagnesujących się w PEM jest mały (np. wolny poruszający się ośrodek). Podstawową zaletą przyjętego modelu jest to, że pozwala on na uzyskanie rozkładów charakterystyk rozważanych procesów w większości przypadków w zamkniętej postaci analitycznej. Pozwala to na opracowanie efektywnych modeli optymalizacyjnych oraz na rozszerzenie modeli poprzez uwzględnienie dodatkowych procesów fizycznych.

Przedstawione rozważania dotyczące określenia stanu termosprężystego ciał ferromagnetycznych przewodzących elektryczność przy oddziaływaniu QUPEM stanowią tylko pewien etap prac badawczych. Można je traktować jako punkt wyjściowy zarówno do pełniejszego opisu różnych efektów oddziaływania pól, jak i do rozwinięcia teorii nieklasycznych, nieliniowych zagadnień fizyki matematycznej. Naszym zdaniem, z punktu widzenia zastosowań QUPEM istotne są następujące dalsze kierunki badań w tej problematyce:

- uwzględnienie nierównoległości wektorów indukcji i natężeń pól elektrycznego i magnetycznego;
- modelowanie procesów przy wysokotemperaturowym nagrzewaniu elektromagnetycznym ciał przewodzących (w szczególności nagrzewanie ciał ferromagnetycznych do temperatury przekraczającej punkt Curie) oraz przebiegów nieustalonych;
- rozwinięcie teorii optymalizacji sprzężonych procesów elektromagnetycznych, temperaturowych i mechanicznych w ciałach ferromagnetycznych przy zewnętrznych obciążeniach elektromagnetycznych;
- uwzględnienie dodatkowych procesów fizycznych (np. dyfuzji) oraz kompleksowych obciążeń (jednocześnie działające siły mechaniczne, temperatura środowiska zewnętrznego, pole elektromagnetyczne itp.);
- rozwinięcie teorii i metod rozwiązywania liniowych i nieliniowych nieklasycznych zagadnień termomechaniki wieloskładnikowych ciał przewodzących, podatnych na magnesowanie i polaryzację, przy elektromagnetycznych obciążeniach szerokiego zakresu częstotliwości (jako klasy zagadnień fizyki matematycznej).

LITERATURA

- [1] BURAK Ya. I., GACHKIEVICH A. R. and SOLODYAK M. T.: Thermoelasticity of electrically conducting magnetically hard bodies in external steady electromagnetic fields, Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSR, Ser. A, No. 5 (1988), 26-29.
- [2] BURAK Ya. I., GACHKIEVICH A. R. and SOLODYAK M. T.: On thermomechanical processes study in electroconductive ferromagnetic

- solids in steady electromagnetic fields, Proc. Of the UITAM Symp. „Mechanical modellings of new electromagnetic materials”, Stockholm, Sweden, 2-6 Apr. 1990. – Amsterdam etc.: Elsevier 1990, 329-335.
- [3] Elektrotiechniczeskij spravocznik. Pod red. M. G. CZILIKINA. Energiija, Moskwa 1964.
- [4] GACHKIEVICH A. R.: Thermomechanics of Electrically Conducting Bodies under the Action of Quasisteady Electromagnetic Fields [in Russian], Naukova Dumka, Kiev (1992).
- [5] GACZKIEWICZ A., KASPERSKI Z.: Modele i metody matematyczne w zagadnieniach brzegowych termomechaniki ciał przewodzących. Studia i Monografie, z. 110, OW Politechniki Opolskiej, Opole 1999.
- [6] GACHKIEVICH A. R. and SOLODYAK M. T.: Thermomechanical behavior of a layer under the influence of a harmonic electromagnetic field: transl. in Int. Appl. Mech. 25. No. 12 (1989), 1251-1258..
- [7] GACHKIEVICH A. R. and SOLODYAK M. T.: A study of the deformation process of electrically conducting ferromagnetic bodies in harmonic external electromagnetic fields: transl. in J. of Sov. Math. 64. No. 3 (1993), 908-913.
- [8] HACHKEVYCH O., SZYMCZAK J.: Wyznaczanie quasi-ustalonych pól elektromagnetycznych w termomechanice powłok przewodzących. Studia i Monografie, z. 304, OWPO Opole 2011.
- [9] KIFER I. I.: Ispytanija ferromahnitnyh matieriałow. Gosenergoizdat, Moskwa 1969.
- [10] KOŁOĞŁU J. P., ZACHARIJEWICZ K. M., KARTASZEWSKAJA M. I.: Miatiały i spławy. Sprawocznik. Kartia Mołdoweniaske, Kisziniow 1969.
- [11] KUDRYAVTSEV B. A. and PARTON V. Z.: Magnetoelasticy, Itogi Nauki i Tekhniki. Mekh. Def. Tver. Tela, Vol. 4 (1981), 3-59.
- [12] PELEKH Ya. N. and SOLODYAK M. T.: Computation of an electromagnetic field in a conducting ferromagnetic layer, Mat. Met. Fiz.-Mekh. Polya, No. 19 (1984), 91-95.
- [13] PRIEOMBRAŽENSKIJ A. A.: Mahnitnyje matieriały i elementy. Wysszaja szkoła, Moskwa 1976.
- [14] RAWA H.: Elektryczność i magnetyzm w technice. PWN, Warszawa 1994.
- [15] TAMM N. E.: Foundations of the Theory of Electricity [in Russian], Nauka, Moscow (1976).
- [16] WOLFART E.: Mahnitotwiordyje matieriały. Gosenergoizdat, Leningrad 1963.

**I. APLIKACJE NAUK PODSTAWOWYCH I
UWZGLĘDNIENIE CZYNNIKÓW
TOWARZYSZĄCYCH W PROCESACH
WYTWÓRCZYCH**



D. PĄCZKO

Opole University of Technology (Poland)

LINEAR EXTENSIONS OF DYNAMICAL SYSTEMS. CONDITIONS OF REGULARITY

Presented research deals with the basic terms for linear extensions of dynamical systems. The relationship of the regularity of these systems to the existence of Green's functions and the boundedness of solutions of certain linear systems of differential equations is shown. Confirmation of these relationships is provided by the formulated regularity condition and numerous examples included in the paper.

LINIOWE ROZSZERZENIA UKŁADÓW DYNAMICZNYCH. WARUNKI REGULARNOŚCI

W referacie tym przedstawiono podstawowe określenia dotyczące liniowych rozszerzeń układów dynamicznych. Pokazano związek regularności tych układów z istnieniem funkcji Greena i ograniczonością rozwiązań pewnych liniowych układów równań różniczkowych. Potwierdzeniem tych związków jest sformułowany warunek regularności i prezentowane liczne przykłady.

R. DREBOTIY¹, H. SHYNKARENKO^{1,2}, V. STELMASHCHUK¹

¹ Ivan Franko National University of Lviv (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

AN ALGORITHM FOR SOLVING THE CAUCHY ADVECTION-REACTION PROBLEM WITH ONE REGULARIZED FINITE ELEMENT SCHEME

In this paper we propose parallel method of solving Cauchy problem for first-order advection-reaction equation formulated in two-dimensional domains. Such problem arises in certain finite element regularization scheme, which requires possibility of fast computation of the problem's solution values in arbitrary points in the domain. Proposed algorithm is based on a method of characteristics and a special interpolation scheme, which provides fast interpolant computation and also admits parallel assembly of reference nodal values set.

ALGORYTM ROZWIĄZANIA PROBLEMU CAUCHY'EGO ZAGADNIENIA ADWEKCJI-REAKCJI PRZY JEDNYM REGULARYZOWANYM SCHEMACIE ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Proponuje się równoległą metodę rozwiązania problemu Cauchy'ego dla równania adwekcji-reakcja pierwszego rzędu sformułowanego w obszarach dwuwymiarowych. Problem taki powstaje przy wykorzystaniu pewnego regularyzowanego schematu elementów skończonych, w którym wymagana jest możliwość szybkiego obliczenia poszukiwanych wartości w dowolnych punktach rozważanego obszaru. Zaproponowany algorytm opiera się na metodzie charakterystyk i specjalnym schemacie interpolacji, który zapewnia szybkie obliczenia, a także umożliwia równoległe składanie zbioru wartości węzłowych.

L. HOSKO¹, Kh. DROHOMYRETSKA¹, P. PUKACH¹,
A. STANIK-BESLER²

¹ National University "Lviv'ska Politechnika" (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

MODELING THE ELECTROMAGNETIC FIELD AND JOULE HEAT IN NON-FERROMAGNETIC CONDUCTING SOLIDS WITH PLANE- PARALLEL BOUNDARIES UNDER ELECTROMAGNETIC INTERACTION. TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS

Non-stationary two-dimensional with respect to coordinates problems of mathematical physics, describing the electromagnetic field and the corresponding Joule heat production in non-ferromagnetic conducting solids with plane-parallel boundaries (layer and plate-strip) under external electromagnetic interaction (determined by the values of the components of the external magnetic field intensity vector on both boundaries (bases)), are formulated. The components of the magnetic field intensity vector tangential to the outer surfaces of the considered solid were selected as the determining function. A method for solving the formulated problem was proposed, based on the approximation of the distribution of the determining function with regard to thickness by a cubic polynomial. The coefficients of this approximation polynomial are expressed by the integral with regard to the thickness variable characteristics of the determining function and its given boundary values on the external surfaces of the considered solids. As a result, the original two-dimensional initial-boundary problem with regard to the determining function was reduced to a one-dimensional corresponding problem with respect to the integral characteristics of the determining functions.

The solution to the problem in terms of integral characteristics in the case of a layer is obtained using the Laplace integral transform with respect to time and the Fourier transform with respect to the longitudinal coordinate. In the case of the plate-strip, the integral characteristics were determined using the finite integral transformation with respect to the transverse (thickness) coordinate and the Laplace transform with respect to time. For the types of solids considered, expressions for the Joule heat are written through the obtained general solutions for integral characteristics.

Such problems arise when developing rational regimes for processing appropriate structural elements using the influence of electromagnetic fields.

MODELOWANIE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO ORAZ CIEPŁA JOULE’A W NIEFERROMAGNETYCZNYCH PRZEWODZĄCYCH CIAŁACH O PŁASKO-RÓWNOLEGLYCH BRZEGACH PRZY ODDZIAŁYWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM. DWUWYMIAROWE ZAGADNIENIA

Sformułowane są niestacjonarne dwuwymiarowe względem współrzędnych zagadnienia fizyki matematycznej, opisujące pole elektromagnetyczne i odpowiednią produkcję ciepła Joule’a w nieferromagnetycznych przewodzących ciałach o płasko-równoległych brzegach (warstwie lub taśmie) przy zewnętrznym oddziaływaniu elektromagnetycznym, określonym przez wartości składowych wektora natężenia zewnętrznego pola magnetycznego na obydwóch brzegach (podstawach). Jako funkcję wyznaczającą wybrane zostały składowe wektora natężenia pola magnetycznego styczne do zewnętrznych powierzchni rozpatrywanego ciała. Zaproponowano metodę rozwiązywania sformułowanego zagadnienia, opartą na przybliżeniu rozkładu funkcji wyznaczającej względem grubości wielomianem sześciennym. Współczynniki tego wielomianu aproksymacyjnego wyrażane są poprzez całkowite względem zmiennej grubościowej charakterystyki funkcji wyznaczającej i jej zadane wartości brzegowe na zewnętrznych powierzchniach rozpatrywanych ciał. W rezultacie pierwotne dwuwymiarowe początkowo-brzegowe zagadnienie względem funkcji wyznaczającej zostało zredukowane do jednowymiarowego odpowiedniego zagadnienia względem charakterystyk całkowych funkcji wyznaczających.

Rozwiązanie zagadnienia względem charakterystyk całkowych w przypadku warstwy otrzymane jest z wykorzystaniem przekształcenia całkowego Laplace’a względem czasu oraz przekształcenia Fourier’a względem współrzędnej podłużnej. W przypadku taśmy charakterystyki całkowite wyznaczono przy pomocy skończonego przekształcenia całkowego względem współrzędnej poprzecznej (grubościowej) oraz przekształcenia Laplace’a względem czasu. Dla rozważanych typów ciał zapisane są wyrażenia dla ciepła Joule’a poprzez otrzymane ogólne rozwiązania dla charakterystyk całkowych.

Takie zagadnienia powstają przy opracowaniu racjonalnych reżimów obróbki odpowiednich elementów konstrukcji przy wykorzystaniu oddziaływania pól elektromagnetycznych.

B. BOZHENKO¹, O. HACHKEVYCH^{1,2}, R. KUSHNIR²,
R. TERLETS'KYI²

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

**THERMOMECHANICS OF FERROMAGNETIC CONDUCTIVE
SOLIDS UNDER QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC
INTERACTION. SELECTED MATHEMATICAL PROBLEMS**

This paper discusses mathematical problems related to the quantitative description of temperature fields and mechanical stresses in isotropic ferromagnetic nonpolarizable conductive solids under the influence of an external quasi-steady electromagnetic field. Such problems arise in the development of processing technologies based on the use of electromagnetic effects.

**TERMOMECHANIKA FERROMAGNETYCZNYCH CIAŁ PRZEWODZĄCYCH
PRZY QUASI-USTALONYM ODDZIAŁYWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM.
WYBRANE PROBLEMY MATEMATYCZNE**

W referacie tym rozpatrywane są matematyczne problemy powiązane z modelowaniem i opisem ilościowym pól temperatury i naprężeń mechanicznych w izotropowych przewodzących elektryczność ciałach ferromagnetycznych niepolaryzujących się przy oddziaływaniu zewnętrznego quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego oraz formułowaniem odpowiednich zagadnień fizyki matematycznej określających parametry opisujące rozważane pola. Takie problemy powstają przy opracowaniu technologii obróbki opartych na wykorzystaniu oddziaływania elektromagnetycznego.

O. HACHKEYVYCH^{1,2}, R. IVAS'KO², A. KOZIARSKA¹, R. TERLETS'KYI²

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

**PHENOMENOLOGICAL (PHYSICAL) EQUATIONS WHEN
DESCRIBING THE MAGNETIZATION PROCESSES OF
FERROMAGNETIC ELECTRICALLY CONDUCTING SOLIDS UNDER
THE INFLUENCE OF A QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC
FIELD**

A variant of physical equations (constitutive relationships) for ferromagnetic nonpolarizable electrically conducting solids is considered to determine the quasi-steady electromagnetic field in the process of its interaction. These equations describe the magnetic properties and electrical conductivity of the solids under consideration. The forms of these equations (relationships) are determined on the basis of specific electrophysical properties of materials, taking into account experimental data, with specific amplitude-frequency characteristics of the external electro-magnetic interaction, and are approximated by analytical relationships between the induction and the intensity of electric and magnetic fields for a ferromagnetic solid.

**RÓWNANIA FENOMENOLOGICZNE (FIZYCZNE) PRZY OPISIE PROCESÓW
MAGNESOWANIA FERROMAGNETYCZNYCH CIAŁ PRZEWODZACYCH
ELEKTRYCZNOŚĆ PRZY ODDZIAŁYWANIU QUASI-USTALONEGO POLA
ELEKTROMAGNETYCZNEGO**

Rozważany jest wariant równań fizycznych (związków konstytutywnych) dla ciał ferromagnetycznych niepolaryzujących się przewodzących elektryczność przy określeniu quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego w procesie jego oddziaływania. Równania te opisują własności magnetyczne i przewodność elektryczną rozważanych ciał. Postaci tych równań (związków) wyznacza się na podstawie szczególnych własności elektrofizycznych materiałów z uwzględnieniem eksperymentalnych danych, przy określonych charakterystykach amplitudowo-częstotliwościowych zewnętrznego oddziaływania elektromagnetycznego i aproksymuje się je analitycznymi zależnościami między indukcją i natężeniem pól elektrycznego i magnetycznego dla ciała ferromagnetycznego, w szczególności w postaci pętli histerezy.

O. HUMENCHUK¹, V. MISHCHENKO¹, B. CHORNYI², A. MARYNOWICZ³

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² National University "Lvivs'ka Politechnika" (Ukraine)

³ Opole University of Technology (Poland)

**A PROBLEM DESCRIBING THE QUASI-STEADY
ELECTROMAGNETIC FIELD IN A FERROMAGNETIC SOLID.
A METHOD FOR SOLVING IT**

A quasi-linear problem of mathematical physics, describing the electromagnetic field in a ferromagnetic nonpolarizable electrically conducting solid under the influence of a quasi-steady electro-magnetic field, was formulated. An iterative method of solving it, based on the introduction of magnetic permeability that changes little over the period and Fourier series representing the solutions with respect to time, was proposed. It was limited to considering two iterations.

**ZAGADNIENIE OPISUJĄCE QUASI-USTALONE POLE
ELEKTROMAGNETYCZNE W CIELE FERROMAGNETYCZNYM. METODA
JEGO ROZWIĄZYWANIA**

Sformułowano quasi-liniowe zagadnienie fizyki matematycznej, opisujące quasi-ustalone pole elektromagnetyczne w ciele ferromagnetycznym przewodzącym elektryczność przy zewnętrznym oddziaływaniu elektromagnetycznym. Przy tym za wyjściową przyjmuje się znaną analityczną zależność (w postaci pętli histerezy) między indukcją a natężeniem pola magnetycznego przy rozważanym oddziaływaniu. Zaproponowano iteracyjną metodę rozwiązywania sformułowanego zagadnienia, opartą na wprowadzonej małowzmieniającej się w okresie drgań elektromagnetycznych przenikalności magnetycznej i szeregach Fourier'a przedstawienia rozwiązań względem czasu. Ograniczono się rozważaniem dwóch iteracji.

B. BOZHENKO¹, R. IVAS'KO², A. STANIK-BESLER¹, A. TORS'KYI²

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

**A PROBLEM DESCRIBING THE THERMOMECHANICAL STATE OF
A FERROMAGNETIC SOLID UNDER THE INFLUENCE OF AN
EXTERNAL QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD.
A SCHEME FOR SOLVING IT**

A problem of mathematical physics, describing the dynamic thermomechanical state of a ferromagnetic nonpolarizable electrically conducting solid under the influence of an external quasi-steady electromagnetic field, is formulated. This state is related to the following factors: heat production and ponderomotive forces generated by the field. A method for solving the problem is proposed. The method is based on the peculiarities of the impact factors and the iterative approach used to determine these factors.

**ZAGADNIENIE OPISUJĄCE STAN TERMOMECHANICZNY CIAŁA
FERROMAGNETYCZNEGO PRZY ODDZIAŁYWANIU ZEWNĘTRZNEGO
QUASI-USTALONEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO. SCHEMAT JEGO
ROZWIĄZYWANIA**

Sformułowano zagadnienie fizyki matematycznej, opisujące dynamiczny stan termomechaniczny ciała ferromagnetycznego przewodzącego elektryczność przy oddziaływaniu zewnętrznego quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego. Stan ten powiązany jest z czynnikami: produkcja ciepłą i siłami ponderomotorycznymi, wytwarzanymi przez pole. Zaproponowano schemat obliczeniowy rozwiązywania zagadnienia. Schemat ten oparty jest na osobliwościach struktury czynników oddziaływania oraz iteracyjnym podejściu, stosowanym przy wyznaczaniu tych czynników.

A. KOZIARSKA

Opole University of Technology (Poland)

**STUDY OF RECRUITMENT-STUDENT SURVEYS COLLECTED AT
THE OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN AUTUMN 2022**

This paper presents an analysis of recruitment-student surveys collected in autumn 2022. The survey was conducted among first-semester undergraduate students. The aim of the survey is to identify factors influencing the decision to choose Opole University of Technology and the field of study. The results obtained will be used to plan the next recruitment process.

**BADANIE ANKIET REKRUTACYJNO-STUDENCKICH ZEBRANYCH W
POLITECHNICE OPOLSKIEJ JESIENIĄ 2022 ROKU**

W referacie przedstawiono analizę ankiet rekrutacyjno-studenckich zebranych jesienią 2022 roku. Badanie zostało przeprowadzone wśród studentów pierwszego semestru studiów pierwszego stopnia. Celem badania jest identyfikacja czynników wpływających na decyzję o wyborze Politechniki Opolskiej i kierunku studiów. Uzyskane wyniki posłużą do uściślenia oraz zaplanowania kolejnych procesów rekrutacji.

Z. SZYLICKA, M. WIATR, K. WOJTECZEK-LASZCZAK

Opole University of Technology (Poland)

**RESULTS OF A SURVEY CONDUCTED AFTER THE END OF THE
WINTER SEMESTER 2022/23 AMONG STUDENTS OF THE OPOLE
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ON MATHEMATICAL SUBJECTS:
ALGEBRA AND ANALYSIS**

Results of a survey among students of Technical University of Opole after the winter semester 2022/23 are presented. Frequency of attendance, analysis of systematic preparation and active participation in lectures and exercises for courses in subjects of Algebra and Analysis are derived. Additionally questions about students' preferred forms of conducting lectures and exercises for mathematical courses, possibilities to improve teaching quality and preferred forms of assessing progress are analyzed. Some results are compared with results of surveys conducted in academic year 2020/21.

**WYNIKI ANKIETY PRZEPROWADZONEJ PO ZAKOŃCZENIU SEMESTRU
ZIMOWEGO 2022/23 WŚRÓD STUDENTÓW POLITECHNIKI OPOLSKIEJ NA
TEMAT PRZEDMIOTÓW MATEMATYCZNYCH: ALGEBRY I ANALIZY**

W referacie przedstawiono wyniki ankiety, przeprowadzonej wśród studentów pierwszego roku Politechniki Opolskiej po zakończeniu zajęć w semestrze zimowym 2022/23, dotyczącej przedmiotów matematycznych: Algebry i Analizy. Na ich podstawie określono częstość frekwencji, systematycznego przygotowywania się oraz aktywnego uczestnictwa w zajęciach z rozważanych przedmiotów. Ponadto przeanalizowano odpowiedzi na pytania na temat przedmiotów matematycznych dotyczące wybieranych sposobów prowadzenia zajęć, możliwości poprawienia efektów kształcenia oraz formy sprawdzenia wiadomości preferowanych przez studentów. Niektóre odpowiedzi na pytania porównano z wynikami ankiet przeprowadzonych w roku akademickim 2020/21.

A. TISZBIEREK

Opole University of Technology (Poland)

**APPLICATION FOR WORKING WITH TEACHING DATA. THE USE
OF PROGRAMMING ENVIRONMENT TOOLS IN ITS
DEVELOPMENT**

The aim of the study is to present and discuss the application created by the author that automates and optimizes teaching. The application was created in the VBA Development Environment and additionally uses Excel tools. The purpose of the developed application is to assist in managing, searching and editing teaching data, such as: student data, grade sets, as well as the calculation and allocation of grades for a given form of assessment. Additionally, by storing data in appropriately prepared spreadsheets, it is possible to prepare their summaries automatically. Properly secured documents are also an ideal form of a handy archive for educators, particularly helpful and important in the process of analyzing data from a specific period of time. Such an analysis will make it much easier to determine whether there is a need to modify the level of difficulty, forms or methods of examinations.

**APLIKACJA DO PRACY Z DANYMI DYDAKTYCZNYMI. ZASTOSOWANIE
NARZĘDZI ŚRODOWISK PROGRAMISTYCZNYCH PRZY JEJ OPRACOWANIU**

Celem opracowania jest przedstawienie i omówienie stworzonej przez autora aplikacji automatyzującej i optymalizującej pracę dydaktyka. Aplikacja powstała w Środowisku Programistycznym VBA, dodatkowo korzysta z narzędzi programu Excel. Zadaniem opracowanej aplikacji jest pomoc w zarządzaniu, przeszukiwaniu oraz edytowaniu danych dydaktycznych takich jak m.in.: dane studentów, zestawy ocen oraz obliczenie i przydział oceny z danej formy zaliczeniowej. Dodatkowo dzięki przechowywaniu danych w odpowiednio opracowanych arkuszach kalkulacyjnych możliwe jest automatyczne opracowywanie ich zestawień. Odpowiednio zabezpieczone dokumenty ponadto stanowią idealną formę podręcznego archiwum dla dydaktyka, szczególnie pomocną i istotną w procesie analizy danych z określonego okresu czasu. Taka analiza znacznie ułatwi wnioskowanie czy istnieje ewentualna potrzeba modyfikacji poziomu trudności, form lub metod egzaminacyjnych,

II. MODELOWANIE I OPTYMALIZACJA PROCESÓW WYTWÓRCZYCH



B. BOZHENKO¹, K. GHAZARYAN², R. TERLETS'KYI³, T. WOŁCZAŃSKI⁴

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Institute of Mechanics NAS (Armenia)

³ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

⁴ Zespół Szkolno-Przedszkolny w Głuszynie (Poland)

**MODELING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL
PROPERTIES OF MAGNETICALLY SOFT FERROMAGNETIC
SOLIDS CONDUCTING ELECTRICITY UNDER THE INFLUENCE
OF A QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD**

Selected mathematical problems related to the modelling and determination of electromagnetic, thermal and mechanical fields in ferromagnetic solids under electromagnetic interaction, were concretized on a case of solids made of magnetically soft materials. Concretization based on the use of specificity in the magnetization process of this widespread type of ferromagnetic materials.

**MODELOWANIE FIZYCZNO-MECHANICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI
MAGNETYCZNIE MIĘKKICH CIAŁ FERROMAGNETYCZNYCH
PRZEWODZĄCYCH ELEKTRYCZNOŚĆ PRZY ODDZIAŁYWANIU QUASI-
USTALONEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO**

Skonkretyzowane zostały wybrane matematyczne problemy, powiązane z modelowaniem i wyznaczaniem pól połączonych: elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych w ciałach ferromagnetycznych przewodzących elektryczność przy rozważanym elektromagnetycznym oddziaływaniu, dla przypadku ferromagnetycznych ciał z materiałów magnetycznie miękkich. Konkretyzacja oparta na wykorzystaniu specyfiki w procesie namagnesowania tego szeroko rozpowszechnionego typu materiałów ferromagnetycznych.

L. HAYEVSKA¹, A. KOZIARSKA², S. MORYŃ³, R. TERLETS'KYI¹

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

³ Zespół Szkół Ogólnokształcących Nr 1 w Sędziejowicach (Poland)

**MODELING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF MAGNETICALLY HARD FERROMAGNETIC SOLIDS
CONDUCTING ELECTRICITY UNDER THE INFLUENCE OF A
QUASI-STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD**

The problem on the modelling and determination of electromagnetic, thermal and mechanical fields in ferromagnetic conductive solids in the process of influence of an external quasi-steady electromagnetic field, was concretized on a case of solids made of magnetically hard materials. The specificity in the magnetization process of the second widely used type of ferromagnetic materials, in particular, the description of the magnetization process in the form of a hysteresis loop, was used.

**MODELOWANIE FIZYCZNO-MECHANICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI
MAGNETYCZNIE TWARDYCH CIAŁ FERROMAGNETYCZNYCH
PRZEWODZĄCYCH ELEKTRYCZNOŚĆ PRZY ODDZIAŁYWANIU QUASI-
USTALONEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO**

Skonkretyzowane zostało zagadnienie o modelowaniu i wyznaczaniu pól połączonych: elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych w ciałach przewodzących ferromagnetycznych w procesie oddziaływania zewnętrznego quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego, dla przypadku ferromagnetycznych ciał z materiałów magnetycznie twardych. Przy tym wykorzystano specyfikę w procesie namagnesowania drugiego szeroko rozpowszechnionego typu materiałów ferromagnetycznych, w szczególności opisu procesu magnesowania w postaci pętli histerezy.

B. CHORNYI¹, O. HACHKEVYCH^{2,3}, R. IVAS'KO³, A. STANIK-BESLER²

¹ National University "Lviv'ska Politechnika" (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

³ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

MODELING AND DETERMINING THE THERMOMECHANICAL STATE OF THE FERROMAGNETIC CONDUCTIVE LAYER UNDER THE INFLUENCE OF A STEADY ELECTROMAGNETIC FIELD

Parameters are determined that characterize the steady electromagnetic field, temperature field and mechanical state in the electrically conductive ferromagnetic layer under the influence of an external electromagnetic field determined by the magnetic field strength values on the surfaces of the layer. The starting scheme is the one in which the solution is obtained in two stages. In the first one, using electrodynamics, the strengths of the magnetic and electric fields are determined. Then, expressions for heat production and ponderomotive forces are written. In the second stage, the problem of dynamic thermoelasticity is solved (when the solving functions are displacement and temperature or stress and temperature). In these problems, the sources of heat and volumetric forces are the thermal production and ponderomotive forces determined in the first stage, respectively. In order to determine the parameters of the electromagnetic field in a steady or quasi-steady approximation (first stage), the iteration method is used, which determines the algorithm for obtaining solutions in the second stage.

MODELOWANIE I OKREŚLANIE STANU TERMOMECHANICZNEGO FERROMAGNETYCZNEJ WARSTWY PRZEWODZĄCEJ W PROCESIE ODDZIAŁYWANIA USTALONEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Wyznaczone są parametry, charakteryzujące ustalone pole elektromagnetyczne, pole temperatury i stan mechaniczny w ferromagnetycznej warstwie przewodzącej elektryczność, przy oddziaływaniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego, określonego wartościami natężenia pola magnetycznego na powierzchniach warstwy. Przy tym za wyjściowy przyjęty schemat, w którym rozwiązanie otrzymuje się w dwóch etapach. W pierwszym – z zagadnienia elektrodynamiki w ustalonym przybliżeniu wyznacza się natężenia pól magnetycznego i elektrycznego. Następnie ustala się wyrażenia na produkcje ciepłą i

siły ponderomotoryczne. W drugim etapie rozwiązuje się zagadnienie dynamicznej termosprężystości (gdy funkcjami rozwiązującymi są przemieszczenia i temperatura lub naprężenia i temperatura). W zagadnieniach tych źródłami ciepła i siłami objętościowymi są odpowiednio wyznaczone w pierwszym etapie produkcja cieplna i siły ponderomotoryczne. Przy tym dla wyznaczania parametrów pola elektromagnetycznego w ustalonym lub quasi-ustalonym przybliżeniu (pierwszy etap) wykorzystywana jest metoda iteracji która określa algorytm otrzymania rozwiązań w drugim etapie.

M. HACHKEVYCH¹, O. HUMENCHUK¹, A. RAWSKA-SKOTNICZNY²,
B. TRISHCH³

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

³ Ivan Franko National University of Lviv (Ukraine)

PECULIARITIES OF THE THERMOMECHANICAL STATE OF A LAYER MADE OF MAGNETICALLY SOFT FERROMAGNETIC MATERIAL WITH ELECTROMAGNETIC INTERACTION

A numerical analysis of the intensity and induction of the magnetic field, heat production, ponderomotive force, temperature and mechanical stresses in the ferromagnetic magnetically soft electrically conductive layer was performed under external electromagnetic influence, given the values of the magnetic field intensity at the bases of the layer. The analysis is based on a model for the quantitative description of coupled fields in ferromagnetic solids under the influence of a quasi-steady electromagnetic field. A number of regularities related to the existing magnetic characteristics of the soft magnetic material and the amplitude-frequency parameters of the electromagnetic field were established.

OSOBLIWOŚCI STANU TERMOMECHANICZNEGO WARSTWY Z MATERIAŁU FERROMAGNETYCZNEGO MAGNETYCZNIE MIĘKKIEGO PRZY ODDZIAŁYWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM

Rozważono numeryczną analizę natężenia i indukcji pola magnetycznego, produkcji ciepłej, siły ponderomotorycznej oraz temperatury i naprężeń mechanicznych w warstwie magnetycznie miękkiej przewodzącej elektryczność przy zewnętrznym ustalonym (lub quasi-ustalonym) oddziaływaniu elektromagnetycznym, zadanym wartościami natężenia pola magnetycznego na podstawach warstwy. Analiza oparta jest na modelu opisu ilościowego pól połączonych: elektromagnetycznych, cieplnych oraz mechanicznych w ciałach ferromagnetycznych przy oddziaływaniu quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego. Ustalono szereg prawidłowości powiązanych z istniejącymi charakterystykami magnetycznymi materiału magnetycznie miękkiego oraz amplitudowo-częstotliwościowymi parametrami pola elektromagnetycznego.

B. BOZHENKO¹, L. HAYEVS'KA², R. IVAS'KO², I. MAKHORKIN²

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

PECULIARITIES OF THE THERMOMECHANICAL STATE OF A LAYER MADE OF MAGNETICALLY HARD FERROMAGNETIC MATERIAL WITH ELECTROMAGNETIC INTERACTION

A numerical analysis of the intensity and induction of the magnetic field, heat production, ponderomotive force, temperature and mechanical stresses in the electrically conductive hard magnetic layer was performed under an external electromagnetic load, given the values of the magnetic field intensity at the bases of the layer. The analysis is based on the model of quantitative description of coupled fields in ferromagnetic solids under the influence of a quasi-steady electromagnetic field. A number of regularities related to the existing magnetic characteristics of the magnetically hard ferromagnetic material and the amplitude-frequency parameters of the electromagnetic field were established.

OSOBLIWOŚCI STANU TERMOMECHANICZNEGO WARSTWY Z MATERIAŁU FERROMAGNETYCZNEGO MAGNETYCZNIE TWARDEGO PRZY ODDZIAŁYWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM

Przeprowadzono numeryczną analizę natężenia i indukcji pola magnetycznego, produkcji ciepłej, siły ponderomotorycznej oraz temperatury i naprężeń mechanicznych w warstwie magnetycznie twardej przewodzącej elektryczność przy zewnętrznym obciążeniu elektromagnetycznym, zadanym wartościami natężenia pola magnetycznego na podstawach warstwy. Analiza oparta jest na modelu opisu ilościowego pól połączonych: elektromagnetycznego, cieplnego oraz mechanicznego w ciałach ferromagnetycznych przy oddziaływaniu quasi-ustalonego pola elektromagnetycznego. Ustalono szereg prawidłowości powiązanych z istniejącymi charakterystykami magnetycznymi materiału ferromagnetycznego magnetycznie twardego oraz amplitudowo-częstotliwościowymi parametrami pola elektromagnetycznego.

N. IVAS'KO¹, R. IVAS'KO², A. MARYNOWICZ³, R. TERLETS'KYI²

¹ Ivan Franko National University of Lviv (Ukraine)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

³ Opole University of Technology (Poland)

THREE-DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC WAVES IN A METAL-COATED FERRITE PLATE. MODELLING AND QUANTITATIVE DESCRIPTION

Using the known technique of finding the characteristics of the magnetic field based on the method of decomposing the desired quantities in the small parameter (as which the ratio of the amplitude of the intensity of the tangential harmonic field to the intensity of the normal constant field is chosen) with the limitation of two decomposition terms, the conditions of excitation of three-dimensional magnetostatic waves in a metal-coated normally magnetized ferrite plate are determined. The regularities of their propagation as a function of the character of the external electromagnetic field and the electrophysical characteristics of the plate material are investigated.

OBJĘTOŚCIOWE FALE MAGNETOSTATYCZNE W METALIZOWANEJ PŁYTCIE FERRYTOWEJ. MODELOWANIE I OPIS ILOŚCOWY

Za pomocą znanej metody wyznaczania charakterystyk pola magnetycznego, opartej na rozwinięciu poszukiwanych wielkości w postaci szeregu względem małego parametru (za który wybrano stosunek amplitudy natężenia stycznego pola harmonicznego do wartości normalnego pola stałego), przy ograniczeniu dwoma członami szeregu, określono warunki powstania i zbadano prawidłowości rozchodzenia objętościowych fal magnetostatycznych w metalizowanej normalnie namagnesowanej płycie ferrytowej w zależności od charakteru zewnętrznego pola elektromagnetycznego i właściwości elektrofizycznych jej materiału.

O. HACHKEVYCH^{1,2}, N. IVAS'KO³, R. IVAS'KO², A. STANIK-BESLER¹

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

³ Ivan Franko National University of Lviv (Ukraine)

THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A MAGNETIZED FERRITE PLATE CONDITIONED BY THE INFLUENCE OF THREE- DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC WAVES

The initial relations defining the thermal and stressed states of a metal-coated normally magnetized ferrite plate are derived using the previously developed model of electromagnetothermomechanics and the results of conducted studies on the propagation regularities of three-dimensional magnetostatic waves. In particular, expressions for the energy and force factors of magnetic field effects conditioning these states are obtained. This paper proposes a methodology for solving the stated problem and analyses the temperature and stress distributions along the thickness coordinate. The study also analyses the frequency dependence of temperature, normal and tangential stresses within the bandwidth where such waves can be excited.

TERMICZNE I MECHANICZNE WŁAŚCIWOŚCI NAMAGNESOWANEJ PŁYTY FERRYTOWEJ UWARUNKOWANE ODDZIAŁYWANIEM OBJĘTOŚCIOWYCH FAL MAGNETOSTATYCZNYCH

Wykorzystując opracowany wcześniej model elektromagnetotermomechaniki oraz wyniki przeprowadzonych badań procesu rozchodzenia objętościowych fal magnetostaticznych w metalizowanej normalnie namagnesowanej płycie ferrytowej, zapisano wyjściowe zależności określające jej stany cieplny i sprężysty, wywołane oddziaływaniem pola elektromagnetycznego. Przy tym otrzymano wyrażenia dla energetycznych i siłowych czynników oddziaływania pola elektromagnetycznego, które w rozważanym przypadku uwarunkowują te stany. Zaproponowano metodologię rozwiązywania sformułowanego zagadnienia i przeanalizowano zależności częstotliwościowe temperatury, naprężeń normalnych i stycznych w ramach pasma przenoszenia (w którym takie fale mogą powstawać), a także rozkłady temperatury i naprężeń względem współrzędnej grubościowej.

O. HACHKEVYCH^{1,2}, N. MELNYK³, R. MUSII³, M. KLAPCHUK³

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

³ National University “Lvivs’ka Politechnika” (Ukraine)

INDUCTION SYSTEMS. MODELING AND DESCRIPTION OF ELECTRIC CURRENTS

Modeling of induction systems that create induction currents (currents in an inductor) is considered. Elements of the relevant electrical circuits and nature of the forcing actions (in particular, sinusoidal or almost sinusoidal voltage) in the examined induction systems are taken into consideration.

A version of the theory of mathematical description of unstable states of electric circuits containing resistor, capacitor and inductance is proposed. The characteristic types of changes in time of currents and voltages in such electric circuits depending on the nature of the disturbing action are considered. Disturbing actions widely used in the practice of magnetic impulse processing and induction heating were chosen. They can be the discharge of the capacitor in the considered induction systems, or the sinusoidal voltage arising in the circuit when the electric circuit is closed.

The structure of expressions describing parameters of the electromagnetic field in an induction coils (inductors) in unstable states is established, as well as the regimes of changes in time of currents that create external to electroconductive workpieces, sinusoidal electromagnetic fields or fields with amplitude modulation.

UKŁADY INDUKCYJNE. MODELOWANIE I OPIS PRĄDÓW ELEKTRYCZNYCH

Rozważano jest modelowanie układów indukcyjnych wytwarzających prądy indukcyjne (prądy w cewce indukcyjnej). Uwzględniono elementy odpowiednich obwodów elektrycznych oraz charakter oddziaływań wymuszających (w szczególności napięcia sinusoidalnego lub prawie sinusoidalnego) w badanych układach indukcyjnych.

Zaproponowano wersję teorii matematycznego opisu stanów niestabilnych obwodów elektrycznych zawierających rezystor, kondensator i indukcyjność. Rozważono charakterystyczne rodzaje zmian w czasie prądów i napięć w takich obwodach elektrycznych w zależności od charakteru działania wymuszającego.

Wybrano działania wymuszające szeroko stosowane w praktyce przetwarzania impulsów magnetycznych i nagrzewania indukcyjnego. Mogą to być wyładowania kondensatora w rozważanych układach indukcyjnych lub napięcie sinusoidalne powstające w obwodzie, gdy obwód elektryczny jest zamknięty.

Ustalono strukturę wyrażeń opisujących parametry pola elektromagnetycznego w cewkach indukcyjnych (induktorach) w stanach niestabilnych, a także reżymy zmian w czasie prądów wytwarzających zewnętrznie w stosunku do ciał elektroprzewodzących sinusoidalne pola elektromagnetyczne lub pola o modulacji amplitudy.

M. HACHKEVYCH¹, O. HACHKEVYCH^{1,2}, L. HAYEVS'KA¹,
O. HUMENCHUK¹

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² Opole University of Technology (Poland)

REGIMES OF THERMO-VACUUM TREATMENT OF LAMPS- REFLECTORS WITH INFRARED ELECTROMAGNETIC RADIATION. MODELING, DETERMINATION AND OPTIMIZATION

The features of heating with the use of infrared radiation during thermal vacuum processing of headlight lamps are considered. On the basis of experimental studies, taking into account the results of mathematical modeling, the optimal variant of such heating of a particular lamp-headlight (the shell of which can be attributed to the shells of the types geometrically close to spherical and modeled by the corresponding spherical shell) was established using standard infrared heating lamps of the quartz-halogen type (KH lamps).

PRZEBIEGI TERMOPRÓŻNIOWEJ OBRÓBK I LAMP-REFLEKTORÓW PRZY NAPROMIENIOWANIU ELEKTROMAGNETYCZNYM W PODCZERWIENI. MODELOWANIE, WYZNACZANIE I OPTYMALIZACJA

Rozpatrywane są osobliwości nagrzewania napromieniowaniem elektromagnetycznym podczerwieni przy technologicznej termopróżniowej obróbce lamp-reflektorów. Na podstawie wyników eksperymentalnych badań z uwzględnieniem modelowania matematycznego otrzymano optymalny wariant takiego nagrzewania dla konkretnej lampy-reflektora (powłoka której jest bliska do powłoki sferycznej i może być modelowana odpowiednią powłoką sferyczną). Nagrzewanie jest realizowane przy pomocy standardowych lamp na podczerwień typu kwarcowo-halogenowych (lamp typu KH).

M. HACHKEVYCH¹, R. MUSII², R. PELEKH², I. SVIDRAK²

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

² National University “Lviv’ska Politechnika” (Ukraine)

TEMPERATURE FIELDS IN SOLIDS WITH PLANE-PARALLEL EDGES IN THE PRESENCE OF HEAT SOURCES. MODELING AND DETERMINATION

Non-stationary two-dimensional problems of heat conductivity for bodies with plane-parallel boundaries (infinite layer and strip-plate) with volume-distributed non-stationary heat sources are formulated. A methodology for constructing a solution to formulated heat conduction problems is proposed. The method is based on the approximation of the temperature distribution over the thickness variable by a cubic polynomial. The coefficients of the approximation polynomial are expressed in terms of the integral (over the thickness variable) temperature characteristics and conditions for boundary values on the outer surfaces of the considered bodies. As a result, the original two-dimensional initial-boundary value problem on the temperature is reduced to a one-dimensional initial-boundary value problem on the integral characteristics of the temperature. Solutions of the one-dimensional initial-boundary value problem are obtained for an infinite layer with plane-parallel boundaries and a plate-strip. At the same time, integral Laplace transform in time and integral Fourier transform in the longitudinal coordinate were used in the case of a layer, and the finite integral transform in the transverse coordinate in the case of a strip-plate. General solutions of the considered two-dimensional initial boundary value problem of heat conductivity under arbitrarily variable spatial coordinates of non-stationary heat sources and conditions of convective heat exchange with the external environment on the surfaces of the considered bodies have been obtained.

POLA TEMPERATURY W CIAŁACH O PŁASKO-RÓWNOLEGLYCH BRZEGACH PRZY OBECNOŚCI ŹRÓDEŁ CIEPŁA. MODELOWANIE I WYZNACZANIE

Sformułowano niestacjonarne dwuwymiarowe zagadnienia przewodnictwa ciepłego dla ciał o granicach płasko-równoległych (nieskończonej warstwie lub

taśmie) z niestacjonarnymi wewnętrznymi źródłami ciepła. Zaproponowano metodologię konstruowania rozwiązań sformułowanych zagadnień przewodzenia ciepła. Metoda oparta jest na aproksymacji rozkładu temperatury względem zmiennej wzdłuż grubości wielomianem sześciennym. Współczynniki tego wielomianu wyrażane są przez całkowite charakterystyki temperatury oraz wartości brzegowe temperatury na powierzchniach rozpatrywanych ciał. W wyniku dwuwymiarowe wyjściowe początkowo-brzegowe zagadnienie temperaturowe zredukowane zostało do jednowymiarowego względem wprowadzonych charakterystyk całkowych temperatury. Otrzymano ogólne rozwiązania zagadnienia dla nieskończonej warstwy o płasko-równoległych brzegach oraz taśmy. Przy tym zostało wykorzystane całkowite przekształcenie Laplace'a względem czasu oraz całkowite przekształcenie Fouriera względem współrzędnej podłużnej – w przypadku warstwy, oraz skończone całkowite przekształcenie względem współrzędnej wzdłuż grubości – w przypadku taśmy. Rozważano przypadek dowolnych, zmiennych względem współrzędnych przestrzennych niestacjonarnych źródeł ciepła i warunków konwekcyjnej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym na powierzchniach rozpatrywanych ciał.

A. KOZIARSKA¹, I. MAKHORKIN², M. MAKHORKIN^{2,3}

¹ Opole University of Technology (Poland)

² Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics
NASU (Ukraine)

³ National University “Lvivs’ka Politechnika” (Ukraine)

SINGULAR INTEGRAL EQUATION WITH CAUCHY KERNEL WHEN MODELING THE LONGITUDINAL SHEAR OF A MULTI-WEDGE SYSTEM

As part of the construction of a mathematical model of a multi-wedge system under longitudinal shear, an analytical approach to the construction of a singular integral equation (SIE) with a Cauchy kernel is proposed, which makes it possible to determine the stress-strain state of a multi-wedge system with loaded radial cracks. It is based on the use of the theory of surplus and the determination of the periodicity of solutions of the characteristic equation of a multi-wedge system. The algorithm developed on the basis of this approach for constructing the SIE with a Cauchy kernel is illustrated by the example of constructing such equation in the case of a two-wedge system with a loaded interphase crack under anti-planar deformation. For certain cases of the two-wedge system geometric and mechanical parameters, the values necessary for the construction of such equation are calculated.

OSOBLIWE RÓWNANIE CAŁKOWE Z JĄDREM CAUCHY'EGO PRZY MODELOWANIU ŚCINANIA PODŁUŻNEGO UKŁADU WIELOKLINOWEGO

W ramach rozbudowy modelu matematycznego opisującego pola mechaniczne w układzie wieloklinowym poddanym ścinaniu podłużnemu, zaproponowano analityczne podejście do konstruowania osobliwego równania całkowego z jądrem Cauchy'ego, przy pomocy którego określany jest stan sprężysto-odkształcalny omawianego układu z obciążonymi pęknięciami promieniowymi. Podejście jest oparte na wykorzystaniu twierdzenia o residuach i warunku okresowości rozwiązań równania charakterystycznego rozpatrywanego układu. Algorytm, opracowany na podstawie tego podejścia, jest zilustrowany przykładem konstruowania równania dla przypadku ścinania

podłużnego układu dwuklinowego z obciążonym pęknięciem międzyfazowym. Obliczono wartości konieczne do otrzymania konkretnego osobliwego równania całkowego dla pewnych parametrów geometrycznych i mechanicznych układu dwukrawędziowego.