

AUTOMATICA and INFORMATICS

ISSN 0861-7562 Print, ISSN 2683-1279 Online

URL: <https://sai-bg.com/category/journals/automatica-and-informatics/>

Year LIX

No. 2/2026

CONTENTS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

S. Stoykova. Platform for Local Fine-Tuning of Large Language Models 5

Key Words: Large language models; management information systems; artificial intelligence; machine learning; local fine-tuning.

Abstract. The study presents a platform designed for local training and inference of popular large language models (LLMs), addressing the growing need for solutions that preserve the privacy of training data. The platform enables researchers and developers to further fine-tune base models using locally stored and processed data through a modular software architecture. It supports a wide range of models and tasks, offering seamless integration with existing machine learning workflows and tools within enterprise management information systems. Two alternative approaches to contextualization of LLMs' knowledge bases are implemented within the platform i.e., indirectly through model tuning (parameter-efficient fine-tuning, reinforcement learning with human feedback and tutorial fine-tuning) and directly through extending the original knowledge base via retrieval-augmented generation. The proposed hybrid solution for knowledge contextualization addresses existing challenges within the generative artificial intelligence field, namely accuracy of generated information (hallucinations), as well as transparency and traceability of generated information to source data. Benchmark results from the platform utilization demonstrate competitive performance in terms of latency, context accuracy, and resource utilization compared to cloud-based alternatives. By decentralizing model development and inference, the platform empowers institutions to maintain data sovereignty, reduce operational costs, and promote sustainable practices in the field of artificial intelligence.

AUTOMATICA

P. Petkov. Application of Differential Topology in Engineering Sciences. A Brief Survey 12

Key Words: Differential topology; smooth manifolds; smooth maps; singularities; matrix computations; regularization.

Abstract. This survey briefly reviews some fundamental concepts of differential topology and discusses their application to the solution of problems arising in engineering disciplines. The use of manifolds to represent families of mathematical models makes it possible to describe parameter-dependent problems and to study their global properties. The study of mappings between manifolds includes the investigation of singular properties of these mappings at certain points of the manifolds. Although such points are not typical, they can have a significant influence on the behavior of the corresponding mapping. The application of manifolds and the associated bifurcation diagrams in parameter space to the analysis of parameter-dependent problems is presented in brief. Examples are provided to illustrate the introduced concepts.

ENERGY SYSTEMS

M. Hadjiski, N. Deliiski, N. Tumbarkova, D. Angelski, P. Vitchev, K. Atanasova. Calculation and Approximation with the Table Curve 2D Software of the Energy Required to Defrost Logs 19

Key Words: Logs; Table Curve 2D; frozen bound water; frozen free water; defrosting; energy consumption.

Abstract. A mathematical description of the thermal energy Q_{w-defr} required for the complete defrosting of logs, i.e. for the complete melting of the ice in them, formed in the wood in winter by the natural freezing of both free and bound water in it, using the software package Table Curve 2D has been presented. This package allows for the selection of equations, which provide the best similarity between the calculated with them values of Q_{w-defr} during thermal treatment of logs containing ice and the respective data obtained experimentally or using

an adequate temperature-energy model of Q_{w-defr} . An approach for computing the energy required for heating to defrost logs subjected to thermal treatment before their subsequent mechanical processing was applied. The approach is based on the use of two personal models. With the help of the non-stationary model, the defrosting times of beech logs with a diameter of 0.4 m, initial temperatures of $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, and moisture content u of $0.4\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $0.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ were determined at operating temperatures in the boiling or steaming equipment equal to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. For different combination of the specified three values of the moisture content and five values of the initial log temperature there are significant differences between the amount of both free and bound frozen water in the logs, which ensures sufficiently large differences between the calculated values of the energy required for defrosting of the logs. Furthermore, the logs with an initial temperature of $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ contain only frozen free water and no frozen bound water at all. Using the determined logs' defrosting durations, with the help of our second stationary model the change in the energy required for defrosting of the investigated logs was calculated. It was found that the studied energy increases from 31.66 to $58.39\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.4\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, from 48.56 to $77.85\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and from 63.39 to $95.33\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when the initial temperature of the logs decreases from $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. The obtained results were approximated using the Table Curve 2D software package. Three quadratic equations were selected, which mathematically describe the dependence of Q_{w-defr} on the initial temperature of the frozen logs for each of the investigated three values of their moisture content. It was found that there is a very small error (within the limits of only 0.8%) between the values of Q_{w-defr} calculated with the equations proposed by Table Curve 2D and their corresponding values calculated with our energy model of Q_{w-defr} . The equations obtained can be used for development and automatic implementation of scientifically based energy-efficient regimes and technologies for defrosting by steaming or boiling of frozen logs with different properties and purposes.

P. Kesova, I. Bachkova. Overview of Intelligent Reference Frameworks, Architectures and Models in Energy Management Systems 29

Key Words: Energy Management Systems; Reference Architectures; Reference Frameworks; Conceptual Models; Semantic Interoperability; Unified Information Models; Industry 4.0; ISO 50001; SGAM; IIRA; OPC UA; IEC 62264.

Abstract. Achieving the objectives of the Industry 4.0 initiative, particularly in relation to the implementation of Energy Management Systems (EnMS) in industry, depends on the structured adoption of reference frameworks, architectures, and models capable of ensuring interoperability, scalability, and continuous enhancement of energy efficiency. In recent years, concepts such as reference frameworks and architectures, conceptual models, ontologies, meta-models, and unified information models have become increasingly prominent in the development and deployment of Energy Management Systems (EnMS). Nevertheless, their simultaneous application frequently results in conceptual uncertainty and overlapping interpretations. The growing use of these concepts requires a clear understanding of their meaning, scope, and interrelationships. This paper presents an overview of intelligent reference frameworks, architectures, and models applied in the development and implementation of industrial energy management systems. The relationships between models, reference frameworks, and architectures are analyzed, with a particular emphasis on clarifying the conceptual distinctions between conceptual models, reference models, meta-models, and meta-meta-models. Building on this analysis, the paper reviews several widely recognized standards and architectural frameworks, including ISO 50001, the Smart Grid Architecture Model (SGAM), the Industrial Internet Reference Architecture (IIRA), OPC Unified Architecture (OPC UA), and the IEC 62264 standard for enterprise control system integration. The paper highlights the contribution of reference architectures to the systematic structuring of complex energy management solutions, and emphasizes the essential role of unified information models in enabling semantic interoperability across heterogeneous systems. The practical relevance, advantages, and constraints of the examined frameworks are evaluated with respect to industrial energy management, real-time monitoring, data-driven optimization, and their integration within intelligent manufacturing environments. The study concludes that reference frameworks and architectures should be viewed as complementary layers of a unified knowledge system: frameworks provide methodological context, architectures define structural organization, models describe functional behavior, and unified information models ensure consistent data representation and exchange. This integrated approach is identified as a key enabler for the development of intelligent, adaptive, and sustainable energy management systems, supporting the transition toward Industry 5.0 and human-centric, energy-efficient industrial environments.

ANNIVERSARY

90th Anniversary of Academician Vasil Sgurev.....36

This issue was published in 2026.

AUTOMATICA and INFORMATICS

ISSN 0861-7562 Print, ISSN 2683-1279 Online

URL: <https://sai-bg.com/category/journals/automatica-and-informatics/>

PUBLISHER

John Atanasoff Society
of Automatics and Informatics
(SAI), Bulgaria

CONTACT US

108 Rakovski St.
1000 Sofia, Bulgaria
sai.bg.office@gmail.com
www.sai-bg.com

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF – Mincho Hadjiski (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Dr.h.c., Professor, Academician of Bulgarian Academy of Sciences, Department of Intelligent Systems, Institute of Information and Communication Technologies (IICT), Bulgarian Academy of Sciences, sai.bg.office@gmail.com

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF – Kamen Spasov (Bulgaria), MSc, MBA, PhD, Professor, Faculty of Economics and Business Administration, Sofia University St. Kliment Ohridski, kspasov@feb.uni-sofia.bg

SCIENTIFIC SECRETARY – Mariana Dotsinska (Bulgaria), MSc of Industrial Automation, Mark M.D. Publishing Agency, m@crystalscope.com

TOPIC EDITORS

AUTOMATICA

Emil Nikolov (Bulgaria), MSc, DSc, PhD, Dr.h.c., Professor, Department of Industrial Automation, Technical University of Sofia, nicoloff@tu-sofia.bg

Ivan Simeonov (Bulgaria), MSc, PhD, Associate Professor, Stefan Angelov Institute of Microbiology, Bulgarian Academy of Sciences, issim@abv.bg

INFORMATICS

Todor Stoilov (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, t.a.stoilov@gmail.com

Grisha Spasov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Department of Computer Systems and Technologies, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, gvs@tu-plovdiv.bg

Stoyan Stoyanov (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, stoyan126@gmail.com

ACHIEVEMENTS AND APPLICATIONS

Kiril Alexiev (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, alexiev@bas.bg

EDUCATION AND QUALIFICATION

Emil Garipov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Department of Systems and Control, Technical University of Sofia, emgar@tu-sofia.bg

Elena Shoykova (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, Department of Computer Science, University of Library Studies and Information Technologies, Sofia, e.d.shoikova@gmail.com

NEWS, INFORMATION, SOCIETY

Ivan Kurtev (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, French Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, Member of the Standing Committee on Post-accreditation Monitoring and Control at the National Evaluation and Accreditation Agency, i.kurtev@mail.bg

MEMBERS

Alexander Gegov (United Kingdom), MSc, PhD, DSc, Reader, Chair of Academic Staff Board, School of Computing, Chair of Academic Staff Association, University of Portsmouth, Member (IEEE), Fellow (HEA), alexander.gegov@port.ac.uk

Alexandra Grancharova (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Department of Industrial Automation, University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, alexandra.grancharova@abv.bg

Andon Topalov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Department of Computer Systems and Technologies, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, topalov@tu-plovdiv.bg

Andrzej Ordys (Poland), MSc, PhD, DSc, SMIEEE, SFHEA, Professor, Warsaw University of Technology, Institute of Automatic Control and Robotics, Faculty of Mechatronics, Andrzej.Ordys@pw.edu.pl

Angel Smrikarov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Head of Centre for Innovative Educational Technologies, Angel Kanchev University of Ruse, ASmrikarov@ecs.uni-ruse.bg

Anthony Shannon (Australia), MA, PhD, DSc, LLD, Emeritus Professor, Warrane College, University of New South Wales, Kensington (Sydney), tshannon38@gmail.com

Arthur Kordon (USA), MSc, PhD, President, Kordon Consulting LLC, R&D Leader at Dow Chemical 2002-2014, Fort Lauderdale, Florida, arthur@kordon-consulting.com

Dimitar Filev (USA), MSc, PhD, Henry Ford Technical Fellow – Control & AI, Research & Advanced Engineering, Intelligent Systems & Control, Fuzzy & Neural Systems, Automotive Applications, Ford Motor Company, dimitar.filev@gmail.com

Gancho Vachkov (Azerbaijan), MSc, PhD, Professor, Baku Higher Oil School (BHOS), Process Automation Engineering (PAE) Department, gancho.vachkov@gmail.com

George Mengov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor of Decision Science and IT Management, Faculty of Economics and Business Administration, Sofia University St. Kliment Ohridski, g.mengov@feb.uni-sofia.bg

Juž Kocijan (Slovenia), MSc, PhD, Professor, Department of Systems and Control, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, jus.kocijan@ijs.si

Kiril Tenekedjiev (Australia), MSc, PhD, DSc, Professor in Systems Engineering, National Centre for Maritime Engineering and Hydrodynamics, Australian Maritime College, University of Tasmania, kiril.tenekedjiev@fulbrightmail.org

Kosta Boshnakov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor of Industrial Automation, University of Chemical Technology and Metallurgy (UCTM), Sofia, kosta.boshnakov@gmail.com

Larry Stapleton (Ireland), MA, PhD, CPIM, Director of Centre for Information Systems and Techno-culture (INSYTE), Waterford Institute of Technology (WIT), larrystapleton@knewfutures.com

Liping Fan (China), MSc, PhD, Professor, College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, flpsd@163.com

Lyubka Doukovska (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Head of Department of Intelligent Systems, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, l.doukovska@mail.bg

Michail Petrov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Department of Control Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, mpetrov@tu-plovdiv.bg

Milena Lazarova (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Head of Department of Computer Systems, Faculty of Computer Systems and Technologies, Technical University – Sofia, milaz@tu-sofia.bg

Mirolyub Mladenov (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria, mladenov@uni-ruse.bg

Nadja Hvala (Slovenia), MSc, PhD, Senior Researcher, Department of Systems and Control, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, nadja.hvala@ijs.si

Natalia Nikolova (Australia), MSc, PhD, Professor in Decision Sciences, National Centre for Ports and Shipping, Australian Maritime College, University of Tasmania, natalianik@gmail.com

Nencho Deliiski (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, University of Forestry in Sofia, deliiski@netbg.com

Nikola Kasabov (New Zealand), MSc, PhD, Professor, Director of the Knowledge Engineering and Discovery Research Centre (KEDRI), Personal Chair of Knowledge Engineering in the School of Engineering, Computing and Mathematical Sciences, Auckland University of Technology, Fellow of Royal Society of New Zealand, nkasabov@aut.ac.nz

Nikola Nikolov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Head of Department of Automation, Technical University of Varna, Bulgaria, nn_nikolov@tu-varna.bg

Nikola Nikolov (Ireland), MSc, PhD, Academic Faculty Member, Department of Computer Science and Information Systems (CSIS), Co-head of the Big Data and Analytics Research Group (BDARG) at CSIS, University of Limerick, nikola.nikolov@ul.ie

Pencho Venkov (Bulgaria), MSc, PhD, Associate Professor, Faculty of Automatics, French Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, pencho.g.venkov@gmail.com

Petia Georgieva (Portugal), MSc, PhD, Associate Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Informatics (DETI), Institute of Electronics and Informatics Engineering of Aveiro (IEETA), Intelligent Robotics and Systems Lab, University of Aveiro, petia@ua.pt

Petia Koprinkova-Hristova (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, pkoprinkova@yahoo.com

Petko Ruskov (Bulgaria), MSc, PhD, Associate Professor, Faculty of Mathematics and Informatics, Sofia University St. Kliment Ohridski, petkor@fmi.uni-sofia.bg

Petrica Vizureanu (Romania), MSc, PhD, Professor, Technical University Iasi, Romania, Universiti Malaysia Perlis, Malaysia, peviz2002@yahoo.com

Plamen Angelov (United Kingdom), MSc, PhD, DSc, Professor, Lancaster University, FIEEE, FIET, Fellow of ELLIS (<https://ellis.eu/fellows>), Director of Research, School of Computing and Communications, founding Director of LIRA Research Centre (www.lancs.ac.uk/lira), p.angelov@lancaster.ac.uk

Radovan Madleňák (Slovakia), MSc, PhD, Professor, Department of Communications, University of Žilina, radovan.madlenak@fpedas.uniza.sk

Stanimir Yordanov (Bulgaria), MSc, PhD, Associate Professor, Department of Automation, Information and Control Systems, Technical University of Gabrovo, sjordanov@gmail.com

Toshko Nenov (Bulgaria), MSc, PhD, Professor, Technical University of Gabrovo, tgnenov@gmail.com

Žarko Čojbašić (Serbia), MSc, PhD, Professor, University of Niš, Mechanical Engineering Faculty, zcojba@ni.ac.rs

PUBLISHING BOARD

CHAIR – Valeri Andreev (MSc, General Manager, Systems Automation Technologies – SAT EOOD, Bulgaria)

DEPUTY CHAIR – Vassil Sgurev (MSc, PhD, DSc, Professor, Academician of Bulgarian Academy of Sciences, Department of Intelligent Systems, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences)

MEMBERS

Ivan Kurtev (MSc, PhD, Professor, French Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, Member of the Standing Committee on Post-accreditation Monitoring and Control at the National Evaluation and Accreditation Agency)

Julian Bojkov (MSc, General Manager, Rittal EOOD, Bulgaria)

Kamen Spasov (MSc, MBA, PhD, Professor, Faculty of Economics and Business Administration, Sofia University St. Kliment Ohridski)

Lyubka Doukovska (Bulgaria), MSc, PhD, DSc, Professor, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Head of Department of Intelligent Systems, Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, l.doukovska@mail.bg

Nikola Petkov (MSc, Sales Manager Process Automation at Siemens EOOD, Bulgaria)

Vladimir Angelov (MSc, General Manager, Honeywell EOOD, Bulgaria)

EDITORIAL OFFICE

Automatica and Informatics Journal, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics (SAI)

108 Rakovski St., 1000 Sofia, Bulgaria
sai.bg.office@gmail.com, www.sai-bg.com

EDITOR – Mariana Dotsinska (MSc of Industrial Automation)

PREPRESS – Mina Yadvkova

ISSN 0861-7562 Print

ISSN 2683-1279 Online

URL: <https://sai-bg.com/category/journals/automatica-and-informatics/>

Платформа за локално обучение на големи езикови модели

С. Стойкова

Platform for Local Fine-Tuning of Large Language Models

S. Stoykova

Department of Control Systems, Faculty of Electronics and Automation, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 25 Tsanko Dyustabanov St., 4000 Plovdiv, Bulgaria, stoykova@tu-plovdiv.bg

Key Words: Large language models; management information systems; artificial intelligence; machine learning; local fine-tuning.

Abstract. The study presents a platform designed for local training and inference of popular large language models (LLMs), addressing the growing need for solutions that preserve the privacy of training data. The platform enables researchers and developers to further fine-tune base models using locally stored and processed data through a modular software architecture. It supports a wide range of models and tasks, offering seamless integration with existing machine learning workflows and tools within enterprise management information systems. Two alternative approaches to contextualization of LLMs' knowledge bases are implemented within the platform i.e., indirectly through model tuning (parameter-efficient fine-tuning, reinforcement learning with human feedback and tutorial fine-tuning) and directly through extending the original knowledge base via retrieval-augmented generation. The proposed hybrid solution for knowledge contextualization addresses existing challenges within the generative artificial intelligence field, namely accuracy of generated information (hallucinations), as well as transparency and traceability of generated information to source data. Benchmark results from the platform utilization demonstrate competitive performance in terms of latency, context accuracy, and resource utilization compared to cloud-based alternatives. By decentralizing model development and inference, the platform empowers institutions to maintain data sovereignty, reduce operational costs, and promote sustainable practices in the field of artificial intelligence.

Въведение

Осъществено литературно проучване по темата “Приложения на изкуствен интелект в информационните системи за управление” [1] показва, че бизнес организациите генерират стойност чрез интегрирането на приложения, базирани на изкуствен интелект в три основни направления.

- **Автоматизация на процесите**, т.е. стойността, генерирана поради автоматизацията на бизнес процесите и прехвърлянето на изпълнението на задачи с ниска добавена стойност от служители към интелигентни инструменти, базирани на ИИ.

- **Интелигентен бизнес и оперативен анализ**, т.е. стойността, генерирана благодарение на анализ на бизнес информация и данни, базиран на методи и техники от областта на машинното обучение.
- **Когнитивно взаимодействие**, т.е. стойността, генерирана поради взаимодействия на служители или клиенти с дигитални асистенти, чатботове и базирани на генеративен изкуствен интелект инструменти и приложения.

В идентифицираните основни литературни източници преобладава внедряването на приложения, базирани на ИИ в областта на автоматизацията на процеси, като по-малко от половината от разгледаните изследвания се концентрират върху извличането на стойност чрез интегриране на ИИ в направленията на бизнес оперативен анализ и когнитивно взаимодействие. Това показва необходимостта от допълнително изследване на приложимостта на ИИ в тези две направления.

Задачите, основаващи се на когнитивно взаимодействие, представляват значителен дял от ежедневните операции, осъществявани в информационните системи за управление в индустрията, което ги превръща във фокус на редица научни изследвания и разработки както в държавния, така и в частния сектор [2, 3]. Тези задачи включват динамичен обмен на информация между потребители/служители и машинен интерфейс, софтуерни платформи и интелигентни дигитални агенти за целите на извличане на познание, систематизиране и обобщаване на информация, генериране на съдържание и подпомагане на процеса по вземане на решения. Това означава, че е необходим интердисциплинарен подход в разработването на модели и изследването на възможни решения в областта.

Въпреки че взаимодействията човек-машина не са нова област на изследване, а всъщност са обект на засилен научноизследователски интерес още от зората на компютърните технологии и информационните науки, развитието на тази област е повлияно драстично през последните няколко години от приоритизираното разра-

ботване и масово интегриране на технологии, базирани на методите на изкуствен интелект, специфично тези с генеративен характер като големите езикови модели (Large Language Models, LLMs).

Масовата комерсиализация на големи езикови модели (LLMs) като ChatGPT, Copilot, Gemini в периода от 2022 г. до момента доведе до преориентиране на редица дистрибутори на интегрирани информационни системи за управление към внедряването на т. нар. интелигентни дигитални агенти (Joule за SAP, Copilot за Dynamics 365, Oracle AI Assistant), базирани на LLM модели към облачните им платформи. Прилагането на LLM базирани решения носи редица предизвикателства по отношение на точност на генерираното съдържание и конфиденциалност на обработваните данни. Отсъствието на прозрачност (explainability) на компоненти, базирани на машинно обучение, и уязвимостта на приложения, базирани на генеративен ИИ, към кибератаки поради голямата свързаност и отвореност на базовите модели (LLMs) се явяват сериозни предизвикателства пред успешното интегриране на технологиите, базирани на изкуствен интелект, в съществуващите системи за индустриална автоматизация [4]. В този контекст, осигуряването на прозрачност, проследимост и обяснимост в процесите на последващо обучение (fine-tuning) и инференция на големи езикови модели се превръщат в основни цели при разработката на приложения, базирани на генеративен изкуствен интелект и при тяхното внедряване към съществуващи информационни системи за управление в индустрията. Основно предизвикателство пред успешното внедряване на големи езикови модели в информационните системи за управление в индустрията е осъществяването на балансирано контекстуализиране на базата знания на модела към съответната приложна област, а в някои случаи към конкретна задача, изискваща специализирано познание [5]. Съществуват различни техники за контекстуализация в рамките на последващото обучение на такива модели:

- **SFT (Supervised Fine-Tuning).** Основният принцип на SFT е използването на общите езикови представяния, усвоени от предварително обучение базов модел, в комбинация с последващо обучение на неговите параметри върху специализиран за съответната приложна област набор от анотирани данни. При техники за контекстуализация на знание от този вид етапът на последващо обучение разчита на наличието на анотирани данни за обучение, т.е. осъществява се обучение с учител, което ограничава приложимостта на такива подходи до задачи, за които съществуват или могат да бъдат съставени анотирани обучителни бази данни. Към този клас от техники за контекстуализация принадлежат FFT (Full Fine-Tuning) и PEFT (Parameter-Efficient Fine-Tuning), като разликата е в обхвата на обучението: FFT осъществява актуализация на теглата на всички параметри на модела в процеса на обучение, а PEFT

само на малък поднабор от параметри на модела в базовата му конфигурация или в допълнително добавени в архитектурата му слоеве. Макар и да е изчерпателен FFT подходът е изчислително скъп и податлив на свръхнапасване, особено когато анотирани данни са ограничени [6]. PEFT [7], включително негови варианти като LoRA [8] и Adapter [7], оптимизира само малък поднабор от параметри, намалявайки изчислителните разходи и подобрявайки ефективността на обучението без компромис в производителността.

- **RLHF (Reinforcement Learning with Human Feedback).** Подход за контекстуализация, който разчита на обратна връзка от потребителя в процеса на генериране на съдържание по отношение на оценяване на качеството на това съдържание спрямо поставената заявка. В този случай оценката на потребителите се използва като инструмент за подобряване на безопасността и управляемостта на генерираното съдържание. Необходимо е да се подчертае, че такива подходи са зависими от съвместното оценяване от страна на потребителите [9].
- **TFT (Tutorial Fine-Tuning).** Включва използването на самия целеви модел едновременно като обучаем и като оценител, като по този начин той функционира като „учител“ в собственото си обучение. Този подход позволява на моделите да генерират собствени данни за обучение (т. нар. симулационни данни), намалявайки зависимостта на процеса на обучение от наличието на набори с анотирани данни [10]. Рискът при такава реализация е в отдалечаването на симулационните данни от условията на решаваната специализирана задача и като резултат влошаване на качеството на генерираното съдържание (например халюцинации, конфабулации).

Алтернатива в областта на контекстуализиране на познание за целите на разширяване на способността на големи езикови модели да генерират по-точно съдържание е т. нар. генериране с добавено извеждане (Retrieval-Augmented Generation, RAG). Това е подход, при който съдържанието, генерирано от голям езиков модел, се позовава на данни, извлечени от външни за модела източници като файлове, бази данни, уеб страници. За разлика от техниките за контекстуализация в процеса на последващо обучение (SFT, RLFT, TFT), които въздействат върху големия езиков модел, актуализирайки теглата на всички или част от неговите параметри, без пряко да разширяват неговата основна база знания, генерирането с добавено извеждане отваря процеса на генериране на съдържание към външни за модела източници на знание. Този подход за контекстуализиране на познание има способността директно да въздейства върху един от основните проблеми при приложението на генеративен изкуствен интелект: неточност или неактуалност в ге-

нерираното съдържание (халюцинации, конфабулации), като оценява генерираното съдържание на базата съответствие на потвърждаваща информация във външни за основополагащия модел бази знания.

Настоящото изследване има за цел да представи разработена платформа, предназначена за локално последващо обучение (fine-tuning) и инференция на популярни големи езикови модели (LLMs), позволяваща комбиниране на подходи за контекстуализация в процеса на последващо обучение (PEFT, RLHF и TTF) на големите езикови модели с алтернативен подход за контекстуализация чрез разширяване на базата знания на модела с външни източници (RAG). Този хибриден подход на контекстуализация на знание отличава разработената платформа от съществуващи платформи за последващо обучение на големи езикови модели като Axolotl, LLaMA-Factory, Unsloth, които не поддържат генериране с добавено извеждане (RAG). Предложеният хибриден подход на контекстуализация на познание, благодарение на RAG, представя адекватна компенсация на основни слабости на приложенията, базирани на големи езикови модели като прозрачност и проследимост на истинността на генерираното съдържание.

Платформата е разработена в отговор на нарастващата нужда от решения, които да съхраняват поверителността и конфиденциалността на използваните за обучение данни и на генерираното в резултат на инференция съдържание. Тя позволява на изследователи и разработчици да осъществяват допълнително обучение на базовите модели върху локално съхранявани и обработвани данни посредством модулна софтуерна архитектура. Платформата поддържа широк спектър от базови модели и задачи, като предлага улеснена интеграция със съществуващи в информационните системи за управление в индустрията работни процеси и инструменти за събиране и обработка на данни.

Разработената платформа Private Edge LLMs:

- Позволява обучение с локален ресурс (локални модели: llama, deepseek-R1, gemma с наличния изчислителен ресурс на периферното устройство: компютър, лаптоп) и локално съхранение и обработка на данните. Подход, който е предпочитан при задачи, изискващи конфиденциалност на данните за обучение, подходящ за приложения в научноизследователски институции.
- Позволява връзка с API към нелокални изчислителни ресурси (GPU, TPU масиви за обучение, достъпни в облака) и/или големи езикови модели в облака (GPT).
- Внедрява функция за генериране с добавено извеждане (Retrieval-Augmented Generation, RAG), която подобрява възможностите на големите езикови модели (LLM), като ги комбинира с външни за модела източници на знания, предоставяйки допълнителен контекст за изпълнение на промпта (тези източници могат да бъдат локални за периферното устройство, на което се

осъществява допълнителното обучение или споделени в облака). Тази функция адресира някои от ограниченията на LLM, като например остаряването на информацията, използвана в първоначалното обучение и помага за редуцирането на т. нар. халюцинации (генериране на неточна информация), като позволява на големите езикови модели да имат достъп и да включват информация от конкретни документи или бази данни при генериране на отговори.

- Предоставя подобрение в проследимостта на източника, използван за генериране на текстово съдържание чрез функция цитиране на източник.

За да бъде осъществено едновременно внедряване на множество големи езикови модели и да бъде управлявано тяхното последващо обучение върху локални ресурси, е необходимо да бъде изградена локална софтуерна платформа, основаваща се на модулна софтуерна архитектура, която да дава необходимата гъвкавост и адаптивност към разнообразието от архитектури и подходи за обучение на големи езикови модели.

Модулна софтуерна архитектура

Модулната софтуерна архитектура, интегрирана в разработената платформа Private Edge LLMs, включва следните елементи:

- **Потребителски интерфейс на приложния слой.** Позволява селекция на базовия голям езиков модел, който ще бъде обучаван от страна на потребителя; селекция на източници на данни за допълнителното обучение и селекция на режима на работа: RAG (генериране на съдържание с добавено извеждане), Search (контекстово генериране на съдържание, където се извеждат като резултат само четирите най-релевантни за потребителската заявка информационни блока) и Basic (неконтекстова инференция на дадения голям езиков модел). Имплементирането на три режима на работа насърчава осъществяването на контрол от страна на потребителя на платформата върху процеса на контекстуализиране на познание на големите езикови модели. Потребителският интерфейс е изграден на базата на отворената библиотека на Python за създаване на уеб интерфейси за модели, базирани на машинно обучение, Gradio. Библиотеката Gradio е предпочетена като основа за изграждане на потребителския интерфейс заради улесненото интегриране на стандартни библиотеки за машинно обучение и обработка на данни в Python, което позволява разширяване и надграждане на разработената платформа с цел адаптирането и внедряването ѝ в работните потоци за обработка на данни на съществуващи информационни системи за управление.

- **Модул за оркестрация на задачи спрямо изборения режим на работа.** Модулът за оркестрация е реализиран на базата на оркестрационната рамка LlamaIndex, която осъществява управление на процесите по обработка на външни за модела източници на знания, индексирание на обработената информация, извличане на информационни блокове на база контекст и генериране на промпт (допълнена с контекст потребителска заявка). Оркестрационната рамка LlamaIndex е избрана заради нейната гъвкавост по отношение на използването на различни модели за векторизация и възможността за интегриране на векторни бази данни с отворен код.
- **Модул за планиране на етапи на изпълнение на заявката.** Задава последователността на изпълнение на потребителската заявка въз основа на шаблон за поведение, отговарящ на изборения режим на работа: RAG и Search режимите разчитат на допълнително контекстуализиране на потребителската заявка, докато Basic режимът позволява инференция на оригиналния голям езиков модел без контекст от външна за модела база знания.
- **Модул за контекстуализиране на потребителските заявки.** Подготвя външната за големия езиков модел база знания (може да бъде локална или разположена в облака). Изходните данни, представени в различни формати (.pdf, .docx, .csv, .pptx, .ipynb, .json, .epub), преминават през процеси на почистване и извличане на текстово съдържание. Полученият текст се сегментира на информационни блокове на база контекст (context chunks), които се преобразуват във векторни представяния (embeddings) с помощта на предварително обучен модел и се съхраняват в динамичната памет.
- **Динамична памет.** Концепция, която надгражда традиционната архитектура на големите езикови модели (LLMs), като им позволява да запомнят потребителски предпочитания и контекст от предишни разговори, да адаптират поведението си спрямо натрупаната информация, да извличат релевантни спрямо потребителската заявка данни от външни или вътрешни хранилища при нужда. Тази функционалност е особено значима за приложения като дигитални асистенти, персонализирани чатботове и други системи, които трябва да поддържат дългосрочна и последователна комуникация. Динамичната памет за разработваната платформа е реализирана посредством векторна база данни Qdrant. Qdrant е високопроизводителна векторна база данни с отворен код, предназначена за семантично търсене в приложения с изкуствен интелект. Тя е оптимизирана за работа с векторни представяния (embeddings), които се използват широко в системи за търсене и генериране с до-

бавено извеждане (RAG). Qdrant е предпочетена пред налични алтернативи като Chroma (само за локално интегриране на RAG) и Pinecone (само за облачно внедряване) заради възможността за комбинирано индексирание на локални ресурси и ресурси в облака. Това позволява платформата да бъде адаптирана към условията на имплементация на информационната система за управление на отделно предприятие или научноизследователска институция, без да е необходимо преструктуриране на самата платформа с цел преодоляване на ограниченията, наложени от вида реализация на системата (в облака, с локален център за обработка и съхранение на данни или хибридно). В допълнение Qdrant предлага нативно хибридно търсене (по вектори и ключови думи), т.е. за осъществяване на търсене за векторни сходства в базата данни не е необходимо интегриране на външна търсачка, както е при популярни алтернативни решения като Weaviate и Milvus. Независимостта на Qdrant от външни услуги за търсене и индексирание опростява процеса на внедряване в съществуващата архитектура за обработка на данни на дадена информационна система за управление и елиминира натрупването на допълнителни разходи за утилизация на външни услуги за индексирание. Допълнително преимущество на избраната векторна база данни Qdrant е ниската предвидима латентност при векторно търсене, която е от критично значение за приложения с генериране с добавено извеждане. Ниската латентност се дължи на прилагането на оптимизиран HNSW (Hierarchical Navigable Small World) алгоритъм за векторно търсене като част от самата Qdrant архитектура, а не като външен за нея елемент, в комбинация с асоцииране на векторни представяния със съответстващите им адресни пространства от паметта (аналогично на memory mapped storage за файлове).

- **Модул за оценяване.** Определя релеванността на индексирания контекстово сегментирани информационни блокове спрямо поставената потребителска заявка на базата на сходство между векторните им представяния, т.е. извършва търсене във векторната база, изчислявайки метрика на сходство (например косинусова близост или скаларно произведение) между вектора на потребителската заявка и векторите на индексирания контекстово сегментирани информационни блокове (context chunks).
- **Модул за генериране на отговор.** Формира допълнена с контекст потребителска заявка (контекстов промпт) за големия езиков модел. Този промпт обикновено включва оригиналната потребителска заявка и текстовото съдържание на извлечените в предната стъпка най-релевантни контекстово сегментирани информационни блокове.

- **Промпт мениджър.** Подава формулирания от модела за генериране на отговор контекстов промпт на LLM доставчика.
- **LLM доставчик.** Поддържа локална база с големи езикови модели, както и интеграция с частни или публични модели, реализирани в облака посредством API. За управление на зависимости, параметри и инсталационни пакети на големите езикови модели е използван Poetry (съвременен инструмент за управление на зависимости и пакиране на Python проекти, който улеснява създаването, изграждането и публикуването на Python библиотеки и приложения). Управлението на пакети и зависимости е от значение за поддръжката и надграждането на платформата във всички етапи от нейния жизнен цикъл.

На *фиг. 1* е представена обобщената структура на разработената платформа за допълнително обучение на големи езикови модели.



Фиг. 1. Модулна архитектура на разработената платформа за допълнително обучение на големи езикови модели

Внедряване на алтернативна схема за контекстуализация на знание RAG

Генериране с добавено извеждане (RAG) е подход, при който съдържанието, генерирано от голям езиков модел, се позовава на данни, извлечени от външни за модела източници с цел подобряване на точността и проследимостта на източниците на информацията, генерирана от такива модели. Схемата за обучение RAG осъществява допълнително обучение в два основни етапа: първо се извличат релевантни документи или техни фрагменти от външна за големия езиков модел база знания въз основа на потребителската заявка; след това тази информация се комбинира със специални контекстови подсказки (т. нар контекстови векторни съответствия), които насочват модела как да използва данните, за да се формира контекстът за генериране на крайния

отговор.

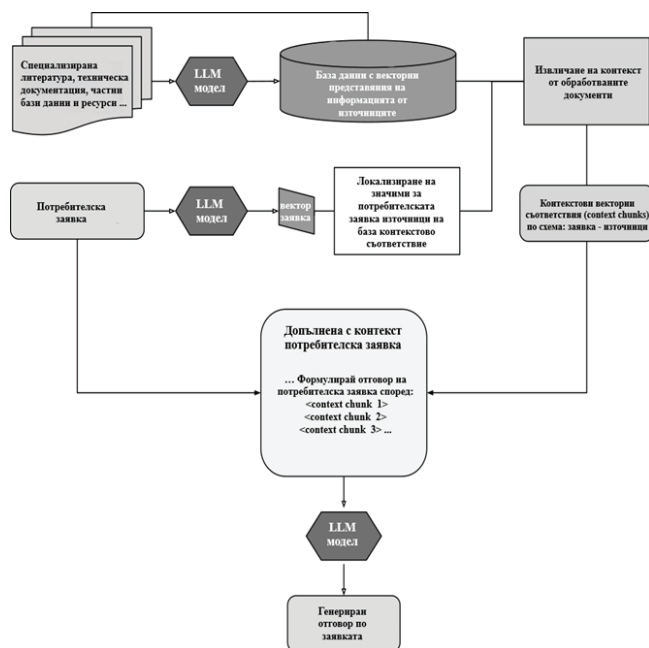
В зависимост от инструкциите в контекстовите подсказки генерираният отговор може да включва цитати или препратки към оригиналните документи, което повишава прозрачността и доверието на потребителите, като им позволява да проверят информацията. RAG помага да се преодолеят ограниченията на LLM като остаряла информация, неточности или халюцинации. Тази схема за обучение разширява базата знания на LLM до практически неограничени размери, осигурявайки бърз достъп до специализирани области или вътрешни данни на организации, научноизследователски институции, университетски библиотеки и т.н.

Функционалните стадии на обработка на информация при внедряване на архитектура за обучение тип RAG са:

- **Индексиране (Indexing).** На този етап се подготвя външната за големия езиков модел база знания. Изходните данни, представени в различни формати, преминават през процеси на почистване и извличане на текстово съдържание. Полученият текст се сегментира на информационни блокове на база контекст (context chunks), които се преобразуват във векторни представяния (embeddings) с помощта на предварително обучен модел. Генерираните вектори, заедно със съответните текстови фрагменти, се индексират и съхраняват в специализирана векторна база данни, оптимизирана за търсене по сходство.
- **Извличане (Retrieval).** При получаване на потребителска заявка, тя се векторизира с помощта на същия модел, използван при индексирането за създаване на векторните представяния (embeddings) на контекстово сегментирани информационни блокове (context chunks). След това системата извършва търсене във векторната база, изчислявайки метрика на сходство (например косинусова близост или скаларно произведение) между вектора на потребителската заявка и векторите на индексираните контекстово сегментирани информационни блокове (context chunks). Извлича се предварително определен брой (K) най-релевантни контекстово сегментирани информационни блокове, които имат най-висока степен на сходство.
- **Генериране (Generation).** В последния етап се формира допълнена с контекст потребителска заявка (контекстов промпт, модифицирана потребителска заявка) за големия езиков модел. Този промпт обикновено включва оригиналната потребителска заявка и текстовото съдържание на извлечените в предната стъпка най-релевантни контекстово сегментирани информационни блокове. LLM моделът обработва този контекстов промпт и генерира финален отговор на потребителската заявка. По време на генерирането моделът може да използва както информацията от предоставе-

ния контекст, така и своите вътрешни параметрични знания, или да бъде инструктиран да се придържа стриктно само към извлечените данни.

На *фиг. 2* е представена диаграма на внедрената архитектура за обучение тип RAG, представяща подробно трите функционални стадия на обработка на потребителската заявка и осъществяване на последващо обучение.



Фиг. 2. Представяне на внедрената схема за обучение тип RAG

Внедрената схема за обучение RAG съчетава силните страни на традиционните системи за извличане на информация като търсачки и бази данни (проследимост и прозрачност на източниците на информация) с информация на генеративните големи езикови модели.

Сравнително изследване на ефективността на платформата при решаване на общи и специализирани задачи

Осъществено е изследване на ефективността на платформата в два вида сценарии спрямо естеството на поставената към големия езиков модел задача:

- **Задача за общо познание (означена като тип А):** според стандартизираните тестове за оценяване на когнитивна способност при LLM: GLUE и MMLU.
- **Задача от специализирана област на познание (означена като тип Б):** разпознаване и контекстуализиране на команди на програмен език MELFA Basic в програмен код за управление на

индустриален робот RH-6CH7020-D за изпълнение на описана траектория.

Сравнението на режимите на обучение се осъществява на базата на стандартизиран параметър за процентна оценка на контекстова точност (КТ, %), който представлява процентно представяне на степента на разпознаване на контекста от потребителския промпт при обработката на заявката за генериране на съдържание от модела.

Табл. 1. Стандартизиран бенчмаркинг

Модел, дата на достъпване	Задача тип А		
	Хардуер за базово обучение	КТ след локално последващо обучение, %	КТ на модел в облака, %
GPT 4.5, февруари 2025	GPU DGX H200/H100	86.2	85.1
Qwen 3-8B, април 2025	GPU DGX A100	86.5	85
Gemma 3-27B, март 2025	TPUv4p, TPUv5p	67.3	66.9
DeepSeek-R1, януари 2025	GPU DGX H800	89.7	88
LLaMA-3.3-70 B, декември, 2024	GPU DGX H200/H100	73	71.3

Табл. 2. Специализиран бенчмаркинг

Модел, дата на достъпване	Задача тип Б			
	Хардуер за базово обучение	КТ при локално обучение, %	КТ на базов модел, %	КТ при хибридно обучение с RAG, %
GPT 4.5, февруари 2025	GPU DGX H200/H100	81	64	87
Qwen 3-8B, април 2025	GPU DGX A100	83	63.2	87
Gemma 3-27B, март 2025	TPUv4p, TPUv5p	62	38.5	65
DeepSeek-R1, януари 2025	GPU DGX H800	73	73	75
LLaMA-3.3-70 B, декември, 2024	GPU DGX H200/H100	66	62.7	87

Резултатите, представени в *табл. 1*, показват, че при задачи за общо познание локалното последващо обучение в платформата Private Edge LLMs постига съизмерима точност на разпознаване на контекст на потреби-

телските заявки с точността, постижима при обучение на съответните модели в алтернативна облачна платформа Hugging Face. Обучението в алтернативната облачна платформа може да бъде асоциирано с т. нар. скрити загуби, произтичащи от ограниченията на платформата по отношение на отделяне на изчислителен ресурс за обучение във времеви диапазони на засилена употреба на платформата. Тези загуби могат да се проявят като удължаване на времето за обучение или натрупване на такси за наднормено използване на изчислителен ресурс спрямо класа потребител в платформата и техния абонаментен план. Локалното обучение предоставя контрол на потребителя върху ограничаване на скритите загуби в процеса на обучение и същевременно гарантира конфиденциалността на обработваните данни, тъй като те не се споделят с външни доставчици на услуги.

Резултатите, представени в табл. 2, показват, че при задачи от специализирана област на познание локалното последващо обучение в платформата Private Edge LLMs постига значимо повишаване в точността на разпознаване на контекст на потребителските заявки в сравнение с точността, постижима с базовите големи езикови модели. Причината е, че базовите модели са обучавани върху огромни бази знание, които съдържат основна информация от множество приложни области, но рядко засягат експертно или специализирано познание за конкретни строго дефинирани приложни сценарии в тези области. За такъв тип задачи е подходящо да се осъществи допълнително контекстуализиране на потребителската заявка с техники за последващо локално обучение (PEFT, RLHF) и/или разширяване на базата знания на модела чрез генериране с допълнително извеждане (RAG).

Заклучение

Представената в изследването разработена платформа Private Edge LLMs за локално последващо обучение (fine-tuning) и инференция на популярни големи езикови модели (LLMs) е подходяща за обработка на данни в научноизследователски институции и в развойните отдели на предприятия, където конфиденциалността на обработваните данни е с висок приоритет. Внедрената схема за обучение RAG подобрява възможностите на големите езикови модели, като ги комбинира с външни за модела източници на знания, предоставяйки допълнителен контекст за изпълнение на потребителските заявки. Реализацията на схема за обучение RAG адресира и предоставя адекватна компенсация на основни слабости на приложенията, базирани на големи езикови модели, като прозрачност и проследимост на източниците на генерирано съдържание и конфиденциалност на обработваните данни за обучение. Платформата се позиционира като иновативно решение в сравнение със съществуващите, тъй като предоставя комбиниран подход към контекстуализацията на знания както в процеса на обучение, така и посредством генериране с добавено извеждане.

Благодарности

Авторът изказва благодарност на сектор „Научно-изследователска и развойна дейност“ при Техническият университет – София, за финансовата подкрепа по проект 242ПД0033-19.

Литература

1. Stoykova, S., N. Shakev. Artificial Intelligence for Management Information Systems: Opportunities, Challenges, and Future Directions. – *Algorithms*, 16, 2023, 357. <https://doi.org/10.3390/a16080357>.
2. Wessel, M., M. Adam, et al. Generative AI and its Transformative Value for Digital Platforms. – *Journal of Management Information Systems*, 42, June 2025, 2, 346–369. <https://doi.org/10.1080/07421222.2025.2487315>.
3. Storey, Veda C., et al. Generative Artificial Intelligence: Evolving Technology, Growing Societal Impact, and Opportunities for Information Systems Research. – *Information Systems Frontiers*, 2025, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10796-025-10581-7>.
4. Хаджийски, М. Разширяване на обхвата на индустриалната автоматизация с ползване на технологиите на изкуствения интелект. – *Автоматика и информатика*, год. LVIII, 2025, № 1.
5. Wu, X.-K., M. Chen, et al. LLM Fine-Tuning: Concepts, Opportunities, and Challenges. – *Big Data and Cognitive Computation*, April 2025, 9, 87. <https://doi.org/10.3390/bdcc9040087>.
6. Lv, K. et al. Full Parameter Fine-Tuning For Large Language Models with Limited Resources. Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), Aug 2024, 8187-8198. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.09782>.
7. Houlsby, N. et al. Parameter Efficient Transfer Learning for NLP. Proceedings of the International Conference on Machine Learning, PMLR, Long Beach, CA, USA, 9-15 June 2019, 2790–2799. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.00751>.
8. Valipour, Mojtaba, et al. DyLoRA: Parameter-Efficient Tuning of Pre-Trained Models Using Dynamic Search-Free Low-Rank Adaptation. Proceedings of the 17th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, May 2023, 3274-3287. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.07558>.
9. Chaudhari, Shreyas, et al. RLHF Deciphered: A Critical Analysis of Reinforcement Learning from Human Feedback for LLMs. – *ACM Computing Surveys*, 58, 2025, 2, 1-37. <https://doi.org/10.1145/374312>.
10. Zamani, I. and A. Jalaly Bidgoly. A New Approach for Lightweight Fine-Tuning Large Language Model by Adding a New Head as an Adapter. University of Qom, Nov 2025. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5719769>.

За контакти:

Ас. маг.-инж. **Стеля Стойкова**

Катедра „Системи за управление“

Факултет по електроника и автоматика

Технически университет – София, филиал Пловдив

stoykova@tu-plovdiv.bg

Приложение на диференциалната топология в инженерните науки. Кратък обзор

П. Петков

Application of Differential Topology in Engineering Sciences. A Brief Survey

P. Petkov

Department of Engineering Sciences, Bulgarian Academy of Sciences, 1040 Sofia, Bulgaria, php@tu-sofia.bg

Key Words: *Differential topology; smooth manifolds; smooth maps; singularities; matrix computations; regularization.*

Abstract. *This survey briefly reviews some fundamental concepts of differential topology and discusses their application to the solution of problems arising in engineering disciplines. The use of manifolds to represent families of mathematical models makes it possible to describe parameter-dependent problems and to study their global properties. The study of mappings between manifolds includes the investigation of singular properties of these mappings at certain points of the manifolds. Although such points are not typical, they can have a significant influence on the behavior of the corresponding mapping. The application of manifolds and the associated bifurcation diagrams in parameter space to the analysis of parameter-dependent problems is presented in brief. Examples are provided to illustrate the introduced concepts.*

1. Увод

Съвременните математически модели, използвани в различни области на естествознанието, са характерни с това, че те не се конституират като единствен модел, отговарящ на определени стойности на параметрите, а представляват семейство от модели, вариращи при изменение на параметрите в някакви граници. Такива модели възникват във физиката, химията, биологията, теорията на управлението, статистиката, аеро- и хидродинамиката, социалните науки и редица други дисциплини. Изследването на такива модели с традиционните методи е затруднено, тъй като свойствата на семейство от модели не могат да се определят като непрекъснати функции на параметрите, при условие че се работи с последователност от модели, получени за фиксирани стойности на тези параметри. Това налага използването на семейства от модели, чиито описания и свойства зависят гладко от параметрите. Ето защо през последните години специалистите от различни научни области проявяват все по-голям интерес към използването на методите на *диференциалната топология*, чиито обекти на изследва-

не са гладките многообразия и гладките изображения. Представянето на математическите модели в естествознанието като гладки многообразия, чиято размерност се определя от броя на независимите параметри, дава възможност съществените свойства на семействата от модели да се представят като гладки функции на тези параметри, което улеснява значително решаването на съответните математически задачи.

Въпросите, на които диференциалната топология прави опит да отговори, са глобални, тъй като те включват цялото многообразие. Диференциалната топология съчетава изучаването на качествените свойства на множества в пространства с произволна размерност, което е обект на топологията, с методите на класическия анализ, позволяващи количествен анализ при малки параметрични изменения. В това отношение е подходящо да се цитират думите на големия американски математик Марстън Морз, казани още през 1934 г.:

Всеки проблем, който е нелинеен по характер, включва повече от една променлива или където структурата първоначално е дефинирана в цялост, вероятно ще изисква разглеждане на топологията и теорията на групите за неговото решаване. При решаването на такива проблеми класическият анализ често ще се явява като инструмент при малки изменения, интегриран над целия проблем с помощта на топологията или теория на групите.

В този обзор разглеждаме накратко някои основни понятия от диференциалната топология и обсъждаме тяхното приложение при решаването на задачи, възникващи в инженерните дисциплини. Направен е опит изложението да има неформален характер, така че да бъде достъпно и за читатели, които нямат специална математическа подготовка.

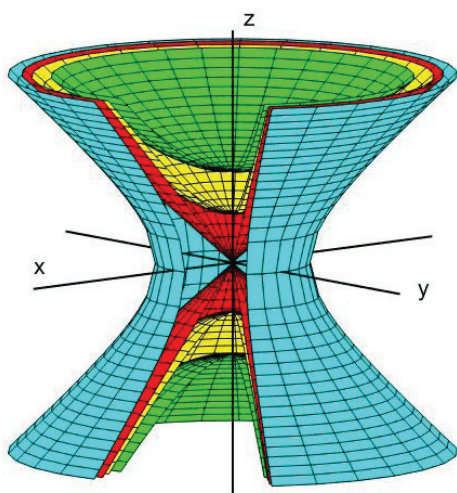
Обзорът е организиран по следния начин. В т. 2 се разглеждат гладките многообразия и гладките изображения между тях. Въведени са важните понятия за тангенциално и нормално пространство на многообразие и

свързаното с тях понятие за диференциал на изображение. Сингулярните точки и стойности на изображения са описани накратко в т. 3. Приведена е важната теорема на Сард, съгласно която сингулярните стойности на изображение са множество с мярка нула. В т. 4 се обсъжда въпросът за т. нар. трансверсално пресичане на многообразия, което играе важна роля при изследването на структурната устойчивост на математически обекти при изменения в техните параметри. В т. 5 е разгледано приложението на диференциалната топология при изследването на обекти, зависещи от параметри. Изследването на свойствата на многообразиата в пространството на параметрите с помощта на бифуркационни диаграми е илюстрирано в т. 6 с пример от матричния анализ. В последната т. 7 са дадени кратки сведения за някои приложения в инженерните науки. Повече информация читателят може да намери в литературата, посочена в края на статията.

2. Гладки многообразия и изображения

В редица приложения често се налага да се разглеждат функции, зададени над множества, които имат по-сложна природа в сравнение с правата линия, равнината или n -мерното координатно пространство, такива като сфера, тор, хиперболоид и т.н. В такива случаи обичайният апарат на диференциалното и интегралното смятане обикновено не може да се използва директно, но идеите, лежащи в неговата основа, допускат обобщение и развитие. Това води до т. нар. *анализ над многообразия*. Многообразието е многомерно обобщение на понятията линия и повърхност без особени точки.

При разглеждане на многообразиата важна роля играе понятието *размерност*. Най-общо казано, размерността е броят на независимите числа (*параметри*), необходими за да се определи точка от многообразието. Например правата е едномерно, а равнината – двумерно многообразие.

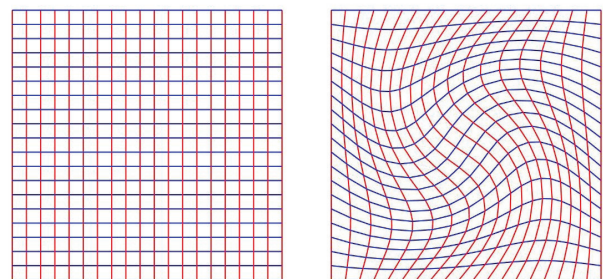


Фиг. 1. Многообразия в тримерното пространство

Първоначалният модел на n -мерно многообразие е n -мерното евклидово пространство, в което всяка точка се представя с n -орка от реални числа. От физична гледна точка, n -мерното многообразие е обект, който има n степени на свобода.

На *фиг. 1* показваме разбиването на тримерното евклидово пространство на слоеве (страти) от гладки многообразия, удовлетворяващи уравнението $x^2 + y^2 - z^2 = C$ за различни стойности на C . Съществен факт е, че различните слоеве не се пресичат помежду си. Обърнете внимание, че най-вътрешният слой (двамата срещуположни конуса с общ връх в нулата) не е гладко, а е алгебрично многообразие, тъй като върхът представлява особена точка (виж т. 3).

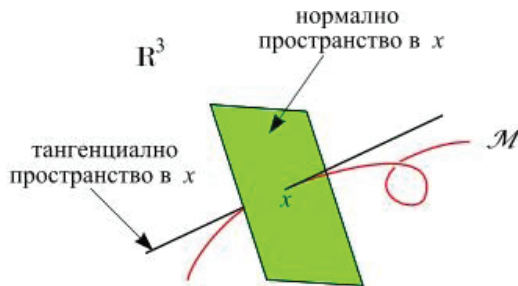
Определението за топологично пространство не дава възможност да се дефинират диференцируеми функции и други понятия на математическия анализ върху многообразия. Редица важни приложения на многообразиата обаче включват математическия анализ. Така например приложението на теорията на многообразиата в геометрията включва такива свойства като обем и кривина. Обикновено обемите се изчисляват посредством интегриране, а кривините се изчисляват чрез диференциране, така че разширението на тези идеи към многообразия изисква някакъв начин за осмисляне на интегрирането и диференцирането над многообразия. Приложенията на класическата механика включват решаването на обикновени диференциални уравнения над многообразия. За да придобият тези понятия смисъл, е необходимо върху многообразието да се дефинира допълнителна структура. По-конкретно, за да се придаде смисъл на производните на реалнозначни функции, криви или многообразия, е необходимо да се въведе нов тип многообразие, каквото е гладкото многообразие. Това е топологично многообразие с допълнителна структура към неговата топология, която позволява да се реши кои функции, от или към многообразието, са гладки. Ако тези функции имат производни от произволен ред, в такъв случай говорим за гладко многообразие. Елементарни примери за гладки многообразия са сферата и торът.



Фиг. 2. Изображение на правоъгълна решетка върху квадрат при дифеоморфизъм от квадрата към самия себе си

Нека са дадени две гладки многообразия. Казано нестрого, ако малка околност на всяка точка на едното многообразие се изобразява *гладко* в малка околност на другото многообразие, съответното изображение се

нарича гладко. Гладките изображения са непрекъснати. Особен интерес представляват т. нар. *дифеоморфизми*, които са гладки изображения, чиито обратни изображения също са гладки. На *фиг. 2* е показано дифеоморфно изображение от квадрат към самия себе си, композирано последователно 10 пъти с малко изместване на всяка итерация.



Фиг. 3. Тангенциално и нормално пространство към многообразие

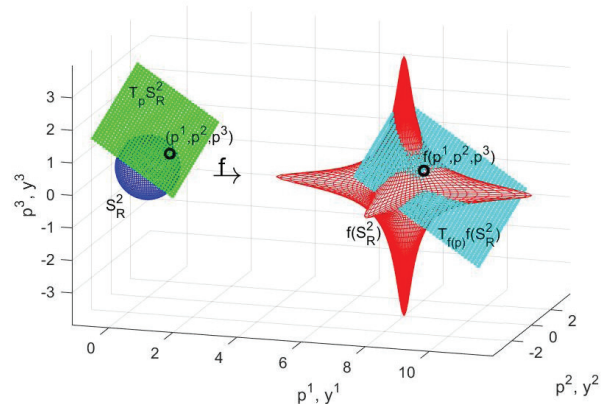
Както и при други задачи в математиката, при изучаването на гладки многообразия е подходящо да се пренебрегнат безкрайно малките величини от по-висок порядък с цел да се опрости анализът на съответната задача. Един от начините за това е да се въведат специални понятия, аналогични на допирателните вектори към криви и допирателните равнини към повърхности, използвани в математическия анализ.

Множеството от вектори, които са допирателни към многообразието M в дадена точка, има структурата на линейно пространство, което се нарича *тангенциално* или *допирателно* пространство към многообразието в дадената точка n . Това пространство се означава с $T_p M$ и има размерност, равна на размерността на многообразието. Ортогоналното допълнение на това пространство се нарича *нормално пространство* и се означава с $N_p M$. Нека разгледаме една пространствена крива в тримерното пространство, която представлява едномерно многообразие. Тогава нормалното пространство може да се представи във вид на равнина, преминаваща през дадената точка, а тангенциалното пространство – като права, която е допирателна към многообразието в точката и е ортогонална на нормалното пространство (*фиг. 3*). Непресичащото се обединение на всички тангенциални пространства се нарича *тангенциално разслоение* и играе важна роля при решаването на редица задачи.

Вместо да се работи с размерността на многообразието M , често е по-удобно да се използва *коразмерността* на M , означавана с $\text{codim}(M)$, която е равна на размерността на нормалното пространство $N_p M$. Тъй като $T_p M + N_p M = S$, където S е околното пространство, имаме че $\dim(M) + \text{codim}(M) = \dim(S)$.

Линейното изображение между тангенциалните пространства на две гладки многообразия се нарича диференциал на изображението между тези многообразия. Матрицата на *диференциала* (матрицата на Якоби) се изчислява чрез намиране на частните производни на функцията, която дефинира изображението. Въвеждането на

понятието за диференциал на изображение дава възможност известните методи на математическия анализ да се разпространят върху гладки многообразия.

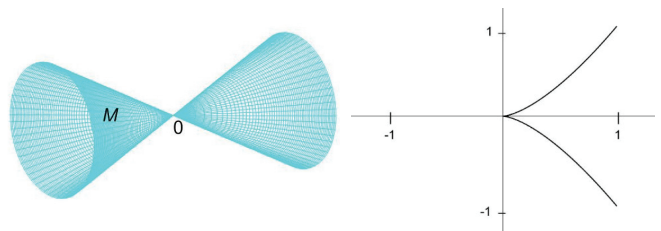


Фиг. 4. Тангенциално пространство на дифеоморфно изображение на сфера

На *фиг. 4* е показано тангенциално пространство на дифеоморфно изображение на сфера, изчислено с помощта на диференциала на това изображение.

3. Сингулярни и регулярни точки и стойности

Изучаването на изображенията между многообразия включва изследване на особените свойства на тези изображения в някои точки на многообразието. Въпреки че тези точки не са типични, т.е. *тяхното множество е с мярка нула*, те могат да имат изключително влияние върху поведението на съответното изображение. Така например в пространството на квадратните матрици това са точките, в които матрицата е особена или пък нейните собствени стойности са кратни и на тях съответстват нелинейни елементарни делители (Жорданови клетки с размерност, по-голяма от 1).

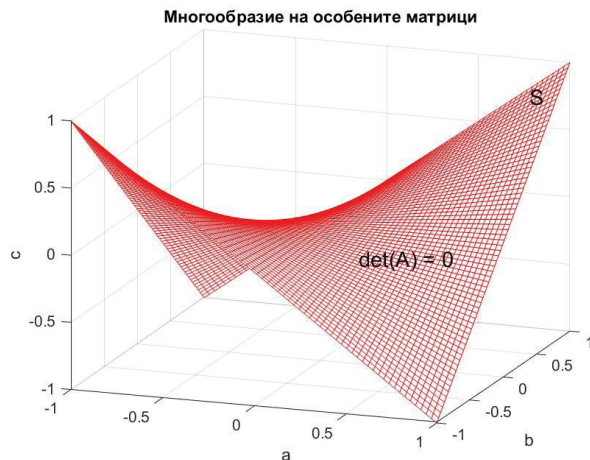


Фиг. 5. Особени точки на многообразия

Нека f е гладко изображение от m -мерно многообразие M към n -мерно многообразие P . Точката p в M се нарича *критична*, *особена* или *сингулярна* точка на f , ако рангът на матрицата на диференциала, т.е. рангът на матрицата на Якоби в тази точка е по-малък от размерността n на P . Образът $f(p)$ на *критичната* точка се нарича *критична* стойност на f . Точката p в M се нарича *регулярна* точка на f , ако тя не е критична. Точката q на P се нарича *регулярна* стойност на f , ако нейното обратно из-

ображение $f^{-1}(q)$ не съдържа критични точки. На *фиг. 5* са показани двумерно многообразие с особена точка (вляво) и кубична крива с острие (вдясно).

Многообразиата, в които има сингулярни точки, се изучават в алгебричната геометрия, която е класическа област на математиката. Основната тема на тази дисциплина са множествата от решения на системи от полиномиални уравнения. Особеностите и по-конкретно сингулярните точки възникват в широк кръг математически и физически обекти.



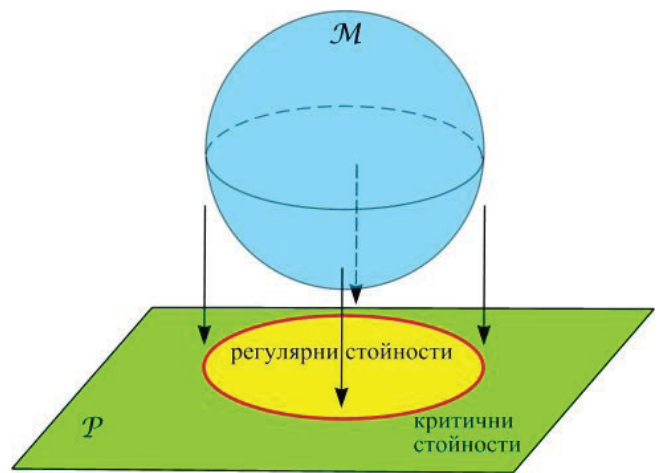
Фиг. 6. Множество на особените матрици в пространство на параметрите

На *фиг. 6* е показано множеството от критичните точки в параметричното пространство, съответстващо на особени матрици във вида

$$A = \begin{bmatrix} a & 1 \\ c & b \end{bmatrix},$$

където a, b, c са свободни параметри. Особените матрици възникват в точките, удовлетворяващи уравнението $\det(A) = ab - c = 0$. В случая многообразието на особените матрици представлява хиперболичен параболоид.

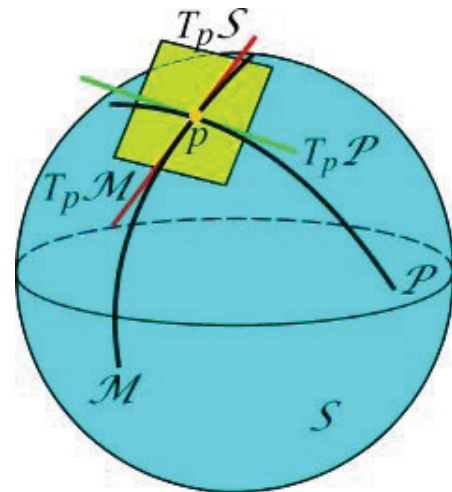
Изследването на резките изменения, които възникват в семейства от обекти, зависещи гладко от параметри, е предмет на т. нар. *теория на особеностите*. Теорията на особеностите лежи в основата на добре известната *теория на катастрофите*. Един много съществен резултат в тази теория е *теоремата на Сард*, съгласно която ако f е гладко изображение от M към P , то *почти всяка* точка q , принадлежаща на P , е регулярна стойност или както се казва в математиката, *множеството на регулярните стойности е плътно*. По този начин достигахме до важния извод, че регулярността на задачите в пространство на параметрите е *генерично*, т.е. типично свойство, а особеностите принадлежат на многообразия с по-ниска размерност. Така например в пространството на $n \times n$ матриците множеството на особените матрици представлява хиперповърхност, т.е. многообразие с размерност $n^2 - 1$.



Фиг. 7. Теорема на Сард

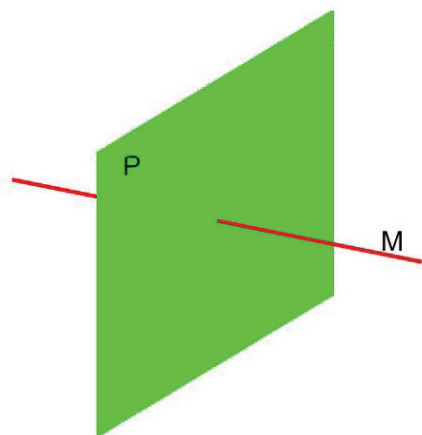
Теоремата на Сард е илюстрирана на *фиг. 7*, от която се вижда, че критичните стойности на сфера принадлежат на окръжност (едномерно многообразие) в равнината P (двумерно многообразие) и поради това принадлежат на множество с мярка нула в P .

4. Трансверсално пресичане на многообразия



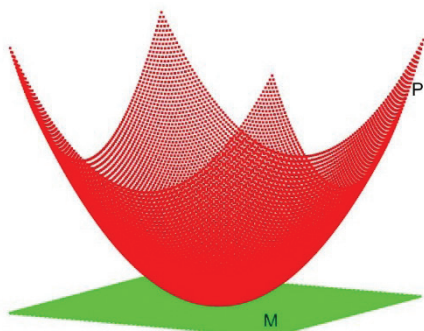
Фиг. 8. Трансверсално пресичане на многообразиата M и P

Концепцията за трансверсалност играе важна роля при решаването на редица задачи, свързани с взаимното разположение на многообразия. Две многообразия M и P , поставени в *околното пространство* S , се пресичат *трансверсално*, ако във всяка точка p на сечението, техните отделни тангенциални пространства $T_p M$ и $T_p P$ в същата точка генерират тангенциалното пространство на околното многообразие $T_p S$ в същата точка (*фиг. 8*). За примера, показан на фигурата, отделните тангенциални пространства са прави, а тангенциалното пространство на околното многообразие е равнина.



Фиг. 9. Трансверсални пресичания на многообразия

На фиг. 9 е показано трансверсалното пресичане на права и равнина в тримерното пространство. Вижда се, сумата на тангенциалните пространства има размерност, равна на 3 (размерността на околното пространство).



Фиг. 10. Пресичане, което не е трансверсално

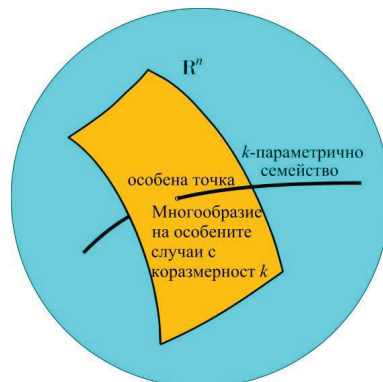
На фиг. 10 е показано пресичането на две многообразия, което не е трансверсално, тъй като равнината M съвпада с тангенциалното пространство на параболоида P в точката на допиране.

Терминът, който често се използва като синоним на трансверсалността, е *общо положение*, т.е. за две многообразия, които се пресичат трансверсално, се казва, че са в общо положение. Както ще бъде показано по-нататък, ако M и P не са в общо положение, произволно малко смущение в едното от тях ще ги постави в общо положение. Също така ако те са в общо положение, те ще останат в него при всякакви достатъчно малки смущения в двете многообразия.

При някои естествени ограничения трансверсалното пресичане на две многообразия може да се разглежда като *устойчиво свойство*, тъй като то се запазва при малки смущения в многообразиата. Този чисто математически извод има важно значение в редица приложни задачи, където целта е да се запази определено свойство на обекта на изследване при малки изменения в параметрите. Съгласно теоремата на Том трансверсалността е генерично (типично) свойство, в смисъл, че всяко нетрансверсално пресичане може да се деформира (с без-

крайно малка деформация) в трансверсално пресичане (този резултат е тясно свързан с теоремата на Сард).

5. Задачи, зависещи от параметри



Фиг. 11. Задачи, зависещи от параметри

На фиг. 11 представяме символично едно k -параметрично генерично семейство от задачи, което пресича трансверсално многообразието на особените случаи (пресичането възниква под ненулев ъгъл). Семейства от задачи, които са трансверсални на всички подмногообразия, се наричат *генерични семейства*. Семейство с k параметри се представя с k -мерно многообразие в параметричното пространство. Например еднопараметрично семейство е кривата в тримерното параметрично пространство с коразмерност, равна на 2, а многообразието на особените случаи има коразмерност, равна на 1. Съгласно принципа на трансверсалността в общия случай многообразието на особените случаи има размерност $n-k$ и коразмерност, равна на k . Следователно коразмерността на многообразието на особените случаи има коразмерност, равна на броя на параметрите, които определят семейството от задачите.

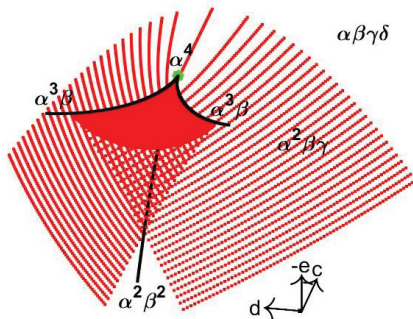
Пресичането на семейството с многообразието на особените случаи може да се измести с малки промени в параметрите, но не може да се отстрани въобще. Трябва да се отбележи, че с приближаването на задачата до многообразието на особените случаи нейната чувствителност към промени в параметрите нараства.

6. Бифуркационни диаграми

Думата *бифуркация* означава деление на две и в общия случай се използва за посочване на всяко качествено, топологично изменение в геометричната картина на математическия обект при вариране на параметрите, от които зависи обектът.

Нека като пример разгледаме задачата за собствени стойности на матрица. Изключителните стойности на параметрите, на които отговарят матриците с кратни собствени стойности (особените случаи), образуват подмножество в пространството на параметрите. Това подмножество се нарича *бифуркационна диаграма*. Би-

фуркационната диаграма на генерично семейство от матрици представлява крайно обединение на многообразието.



Фиг. 12. Бифуркационна диаграма на 4x4 матрица

На фиг. 12 е показана бифуркационната диаграма (т. нар. „лястовича опашка“) на 4x4 съпровождащата матрица

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -c & -d & -c & 0 \end{bmatrix}$$

където параметрите c , d и e определят матрично семейство. Характерните точки на бифуркационната диаграма отговарят на следните Жорданови форми на матрицата:

- $\alpha\beta\gamma\delta$ – 4 прости собствени стойности (типичният случай);
- $\alpha^2\beta\gamma$ – 1 Жорданов блок с двукратна собствена стойност и две прости собствени стойности;
- $\alpha^2\beta^2$ – 2 Жорданови блока с различни собствени стойности;
- $\alpha^3\beta$ – 1 Жорданов блок с трикратна собствена стойност и една проста собствена стойност;
- α^4 – 1 Жорданов блок с четирикратна собствена стойност.

Извън този обзор остават редица съществени теми в диференциалната топология, на които тук нямаме възможност да се спрем, като векторните полета, групите и алгебрите на Ли и т.н. Подробно изложение на тези теми може да се намери в цитираната в края на обзора литература.

7. Приложения на диференциалната топология

Диференциалната топология има важни приложения във физиката (обща теория на относителността, теория на струните, механика на флуидите), където тази математическа дисциплина предоставя инструменти за изучаване на криволинейни пространствено-временни съотношения, инженерните науки (роботика, цифрова обработка на сигнали), компютърните науки (компю-

терно зрение, машинно обучение чрез проектиране на данните върху многообразието с по-ниска размерност) и анализ на данните (информационна геометрия при вероятностни данни). Диференциалната топология има и значително въздействие в чистата математика, предоставяйки методи за изучаване на свойствата на многообразието и решаване на сложни задачи като например хипотезата на Поанкаре.

Инженерни и компютърни науки

• Роботика

Диференциалната геометрия предлага ефективни методи за синтезиране на зададени траектории, управление на движението и системи за избягване на препятствия за робототехнически системи.

• Компютърно зрение и обработка на изображения

Методите на диференциалната геометрия се използват, за да се анализират и опишат форми и данни за процесите, които съществуват върху неплоски повърхности.

• Машинно обучение и обработка на данни

Техники за машинно обучение, при които върху данни с висока размерност се извършва нелинейно редуциране на размерността, проектирайки ги върху пространство с ниска размерност, което представлява многообразие, вложено в пространството с висока размерност.

• Обработка на сигнали

Диференциалната геометрия се прилага за решаване на задачи за цифрова обработка на сигнали.

Анализ на данни и теория на информацията

• Информационна геометрия

Информационната геометрия използва концепции от диференциалната геометрия за третиране на вероятностни разпределения като точки върху Риманови многообразието. Една такава концепция например е информационна метрика на Фишер, която се използва при анализа на статистически модели.

• Невровизуализация

Симетричните положително определени многообразието се използват за моделиране на матриците на връзките в невовизуализацията и приложенията на мозъчно-компютърния интерфейс.

Литература

1. Арнольд, В. Обыкновенные дифференциальные уравнения. 2-е изд. МЦНМО, Москва, 2014.
2. Арнольд, В. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. 2-ое изд. Ижевская республиканская типография, Ижевск, 2000.
3. Guillemin, V., A. Pollack. Differential Topology. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1974.
4. Lee, J. M. Introduction to Topological Manifolds. 2nd Ed.

Graduate Texts in Mathematics, vol. 202. Springer, New York, 2011.

5. Lee, J. M. Introduction to Smooth Manifolds. 2nd Ed. Graduate Texts in Mathematics, vol. 218. Springer, New York, 2013.

6. Позняк, Э., Е. Шикин. Дифференциальная геометрия: Первое знакомство. Издательство Московского университета, Москва, 1990.

7. Tu, L. W. An Introduction to Manifolds. Springer-Verlag, New York, 2011.

8. Burns, K., M. Guidea. Differential Geometry and Topology: With a View to Dynamical Systems. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2005.

9. Мищенко, А., А. Фоменко. Краткий курс дифференциальной геометрии и топологии. Классический университетский учебник. Физматлит, Москва, 2004.

10. Борисович, Ю., Н. Близняков, А. Израилевич, Т. Фоменко. Введение в топологию, 3-е изд. Классический учебник. МГУ. Ленанд, Москва, 2015.

11. Hirsh, M. W. Differential Topology. Springer-Verlag, New York, 1976.

12. Petkov, P. The Numerical Jordan Form. World Scientific, Singapore, 2024.

13. Арнольд, В. И. Математические методы классической механики. 3-ое изд., Наука, Москва, 1989.

14. Арнольд, В. И. Теория катастроф. Наука, Москва, 1990.

15. Станилов, Г. Диференциална геометрия. Тилиа, София, 1997.

За контакти:

Акад. проф. д.т.н. **Петко Петков**
Отделение за инженерни науки
Българска академия на науките
php@tu-sofia.bg

ФНТС ВИ ПРЕДЛАГА КОМПЛЕКСНИ УСЛУГИ:

Специалисти-консультанти за разработване на проекти, свързани с технологични иновации, финансова политика, патентна защита и др.

Федерацията на научно-техническите съюзи ще ви осигури конферентни и изложбени зали, симултанна техника и мултимедия, отлични възможности за провеждане на вашите събития, промоции, коктейли.

Спестете време, средства и енергия като се възползвате от комплексните услуги на Федерацията и удобните зали от 14 до 220 места, в центъра на София.

ЗАПОВЯДАЙТЕ ПРИ НАС!



Зала брой места брой часове	Делнични дни				Почивни и празнични дни		
	до 2 часа	до 4 часа	от 4 до 8 часа	от 8 до 12 часа	до 4 часа	от 4 до 8 часа	от 8 до 12 часа
Зала №1 (45 кв. м)	102 EUR	204 EUR	306 EUR	409 EUR	306 EUR	409 EUR	562 EUR
Зала №2 (40 места)	102 EUR	204 EUR	306 EUR	409 EUR	306 EUR	409 EUR	562 EUR
Зала №3 (90 места)	153 EUR	255 EUR	409 EUR	562 EUR	383 EUR	511 EUR	613 EUR
Зала №4 (220 места)		409 EUR	613 EUR	766 EUR	511 EUR	766 EUR	1022 EUR
Зала №105 А (54 места)	102 EUR	153 EUR	255 EUR	409 EUR	281 EUR	409 EUR	562 EUR
Зала №109 (27 места)	76 EUR	127 EUR	204 EUR	255 EUR	255 EUR	306 EUR	409 EUR
Зала №302 (14 места)	54 EUR	76 EUR	127 EUR	204 EUR	127 EUR	204 EUR	255 EUR
Зала №312 (25 места)	76 EUR	127 EUR	204 EUR	255 EUR	255 EUR	306 EUR	209 EUR
Зала №507 (20 места)	54 EUR	76 EUR	127 EUR	204 EUR	127 EUR	204 EUR	255 EUR

Цените са без ДДС и са в сила от 01. 01. 2026 г. !

София, 1000, ул. „Г. С. Раковски“ №108; www.fnts.bg
Национален дом на науката и техниката
тел: +359 2 987 72 30, e-mail: info@fnts.bg



Изчисляване и апроксимиране със софтуера Table Curve 2D на енергията, необходима за размразяване на трупи

М. Хаджийски, Н. Делийски, Н. Тумбаркова, Д. Ангелски, П. Вичев, К. Атанасова

Calculation and Approximation with the Table Curve 2D Software of the Energy Required to Defrost Logs

M. Hadjiski, N. Deliiski, N. Tumbarkova, D. Angelski, P. Vitchev, K. Atanasova

¹ Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev St., Bl. 2, 1113, Sofia, Bulgaria, zdravkah@abv.bg

² University of Forestry, 10 St. Kliment Ohridski Blvd., 1797, Sofia, Bulgaria, deliiski@netbg.com, ntumbarkova@abv.bg, d.angelski@gmail.com, p_vitchev@abv.bg, k.atanasova@lu.bg

Key Words: Logs; Table Curve 2D; frozen bound water; frozen free water; defrosting; energy consumption.

Abstract. A mathematical description of the thermal energy Q_{w-defr} required for the complete defrosting of logs, i.e. for the complete melting of the ice in them, formed in the wood in winter by the natural freezing of both free and bound water in it, using the software package Table Curve 2D has been presented. This package allows for the selection of equations, which provide the best similarity between the calculated with them values of Q_{w-defr} during thermal treatment of logs containing ice and the respective data obtained experimentally or using an adequate temperature-energy model of Q_{w-defr} . An approach for computing the energy required for heating to defrost logs subjected to thermal treatment before their subsequent mechanical processing was applied. The approach is based on the use of two personal models. With the help of the non-stationary model, the defrosting times of beech logs with a diameter of 0.4 m, initial temperatures of $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, and moisture content u of $0.4\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $0.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ were determined at operating temperatures in the boiling or steaming equipment equal to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. For different combination of the specified three values of the moisture content and five values of the initial log temperature there are significant differences between the amount of both free and bound frozen water in the logs, which ensures sufficiently large differences between the calculated values of the energy required for defrosting of the logs. Furthermore, the logs with an initial temperature of $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ contain only frozen free water and no frozen bound water at all. Using the determined logs' defrosting durations, with the help of our second stationary model the change in the energy required for defrosting of the investigated logs was calculated. It was found that the studied energy increases from 31.66 to $58.39\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.4\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, from 48.56 to $77.85\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.6\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and from 63.39 to $95.33\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ at $u = 0.8\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ when the initial temperature of the logs decreases from $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. The obtained results were approximated using

the Table Curve 2D software package. Three quadratic equations were selected, which mathematically describe the dependence of Q_{w-defr} on the initial temperature of the frozen logs for each of the investigated three values of their moisture content. It was found that there is a very small error (within the limits of only 0.8%) between the values of Q_{w-defr} calculated with the equations proposed by Table Curve 2D and their corresponding values calculated with our energy model of Q_{w-defr} . The equations obtained can be used for development and automatic implementation of scientifically based energy-efficient regimes and technologies for defrosting by steaming or boiling of frozen logs with different properties and purposes.

1. Увод

За оптимизиране на различни процеси на топлинно обработване, в т.ч. на размразяването на дървени материали, е необходимо да е известно разпределението на температурното поле в тях и консумираната енергия за нагряването им. Интензивността на нагряване и консумацията на енергия зависят от дървесния вид, размерите и началната температура на материалите, от съдържанието и агрегатното състояние на водата в тях, от закона на изменение и стойностите на температурата на нагряващата среда и други [1, 2, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 27, 28, 30].

Правилният и ефективен контрол на процеса на размразяване е възможен само когато неговата физика и тежестта на влиянието на всеки от споменатите по-горе и много други фактори за конкретните дървени материали са изяснени добре и описани математически. Отразяване влиянието на тези фактори върху размразяването на дървените материали е трудна задача и решаването ѝ

е възможно само с помощта на адекватни математични модели, които имат повишена сложност особено в случаите, когато нагряваната дървесина съдържа лед.

Разработването на такива температурно-енергийни модели се осъществява с помощта на частни диференциални уравнения и изисква задълбочени математични познания. Решаването на моделите без каквито и да било опростявания като правило се извършва чрез разработване на сложни специализирани софтуерни пакети, използващи числените методи на крайните разлики или крайните елементи. То предполага наличието на задълбочени математични и софтуерни знания и експертиза [3, 4, 6, 8, 9, 15, 15, 18, 21, 25, 26].

В [5, 12] е предложен подход за изчисляване на енергията, необходима за нагряване с цел размразяване на различни дървени материали, в т.ч и на трупи. Той се базира на сравнително лесни за прилагане алгебрични уравнения за определяне на всичките четири вида отделни компоненти на тази енергия, а именно: за нагряване на самата замръзнала и незамерзала дървесина, за топене на температурно зависимата замръзнала част от свързаната вода и за топене на цялата замръзнала свободна вода в дървесината.

Цел на настоящата работа е да се използва достъпният в Интернет софтуерен пакет Table Curve 2D (<http://www.sigmaplot.co.uk/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>) за достатъчно точно и удобно за практическо прилагане математично описание на изменението на сумарната енергия, която е необходима за размразяване на трупи, съдържащи лед в надхигроскопичния диапазон.

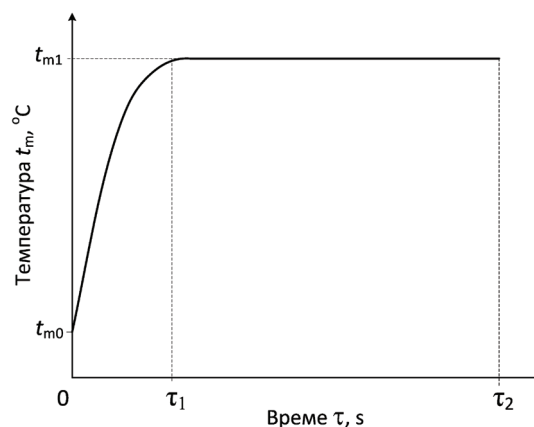
2. Методология на изследването

2.1. Материал за изследването

Това изследване е извършено върху съдържащи лед букови (*Fagus sylvatica* L.) трупи, които се използват често в производството на фурнир и фасонирани материали. Изчисляването на необходимата за размразяване на трупите енергия е осъществено за случая на тяхно пропарване или проваряване при температура на нагряващата среда $t_m = 80^\circ\text{C}$ в съоръжения, работещи при атмосферно налягане.

На *фиг. 1* е показано изменението на температурата t_m при прилаганите в практиката режими за размразяване на дървени материали при атмосферно налягане [2, 4, 6, 7, 17, 20, 28, 30]. Тези режими се състоят от две степени, по време на които t_m се изменя по следния начин:

- По време на първата степен в течение на времето от 0 до τ_1 се осъществява повишаване на t_m от началната ѝ стойност t_{m0} до максималната за даден режим стойност t_{m1} . Това се извършва чрез изцяло или частично отваряне на вентила за подаване на пара или гореща вода към съоръжението за пропарване или проваряване.



Фиг. 1. Изменение на температурата на нагряващата среда в режимите за размразяване на трупи

- По време на втората степен на режима в течение на времето от τ_1 до τ_2 се подава дозирано количество топлоносител към съоръжението за размразяване. По този начин се поддържа неизменна стойност на t_m , равна на максималната технологично целесъобразна за конкретния дървесен вид стойност t_{m1} .

В края τ_2 на режима температурата в центъра на нагряваните трупи достига 0°C , като настъпващото пълно размразяване на трупите осигурява намаляване на енергийния разход при последващото им механично обработване.

Означенията, размерността и стойностите на основни параметри на трупите и на режимите за тяхното нагряване с цел размразяване, които са използвани в симулациите с показаните по-долу математични модели, са дадени в *табл. 1*.

Следва да се отбележи, че при комбинациите между трите стойности на съдържанието на вода и петте стойности на началната температура на трупите, които са дадени в *табл. 1*, съществуват значителни разлики в съдържанието както на замръзнала свободна, така и на свързана вода в дървесината. Това осигурява твърде големи разлики между изчислените стойности на енергийната консумация на трупите, което благоприятства анализа на получените резултати.

Освен това, трупите с начална температура -1°C съдържат само замръзнала свободна вода, т.е. в тях липсва замръзнала свързана вода.

2.2. Модел на 1D разпределение на температурата в съдържащи лед трупи при тяхното размразяване

Когато, обичайно за практиката, дължината на трупите L е поне 4-5 по-голяма от диаметъра им D , тогава за изчисляване на нестационарното температурно поле по радиуса на трупите в централното им напречно сечение по време на размразяването им може да се използва следният нелинеен 1D математичен модел [4, 5]:

Табл. 1. Основни параметри на буковите трупи и режимите за размразяването им, използвани при решаването на математичните модели

№	Наименование на параметъра	Означение	Размерност	Стойност
1.	Диаметър на трупите, подложени на размразяване	D	m	0.4
2.	Дължина на трупите	L	m	2.0
3.	Съдържание на вода в трупите (a – при $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b – при $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, c – при $u = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	u	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.4a, 0.6b, 0.8c$
4.	Хигроскопичност на бука при 293.15 K (т.е. при 20 °C)	$u_{\text{fip}(293.15\text{K})}$	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.310
5.	Хигроскопичност на бука при 272.15 K (т.е. при -1 °C)	$u_{\text{fip}(272.15\text{K})}$	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.331
6.	Базисна плътност на буковата дървесина	ρ_b	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	560
7.	Плътност на влажната дървесина, равна на $\rho_b \cdot (1+u)$	ρ_w	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$784a, 896b, 1008c$
8.	Плътност на замръзналата вода в дървесината	ρ_{ice}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	917
9.	Начална средномасова температура на трупите (d – при $t_{w0} = -1$ °C, e – при $t_{w0} = -10$ °C, f – при $t_{w0} = -20$ °C, g – при $t_{w0} = -30$ °C, h – при $t_{w0} = -40$ °C)	t_{w0}	°C	$-1d, -10e, -20f, -30g, -40h$
10.	Температура на окончателното разтопяване на замръзналата свързана вода в трупите	$t_{\text{bw-end}}$	°C	-1
11.	Температура на окончателното разтопяване на замръзналата свободна вода в трупите	$t_{\text{fw-end}}$	°C	0
12.	Средномасова температура на трупите с $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ в края τ_2 на режимите за размразяването им в зависимост от t_{w0}	$t_{\text{avg-end}}$	°C	$48.8d, 49.7e, 50.6f, 51.5g, 52.4h$
13.	Начална температура на режимите за размразяване	t_{m0}	°C	10
14.	Продължителност на режимите в участъка им $0 - \tau_1$	τ_1	h	4.0
15.	Температура на режимите в участъка им $\tau_1 - \tau_2$	t_{m1}	°C	80
16.	Температура в центъра на трупите в края на пълното им размразяване	t_{wc}	°C	0

$$(1) \quad c_{w\text{-eff.1,2,3}} \cdot \rho_w \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{w\text{-eff.1,2}} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial \lambda_{w\text{-eff.1,2}}}{\partial T} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2$$

с начално условие

$$(2) \quad T(r, 0) = T_{w0}$$

и следното кондуктивно гранично условие:

$$(3) \quad T(0, \tau) = T_m(\tau),$$

където $c_{w\text{-eff.1,2,3}}$ са специфичните топлинни капацитети на трупите по време на 1-та, 2-та и 3-та степен на процеса на тяхното размразяване до достигане в центъра им на температура 0 °C (виж уравнения (5), (6) и (7)), $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\lambda_{w\text{-eff.1,2}}$ – ефективен коефициент на топлопроводност в радиално направление на трупите съответно в замръзнало и незамръзнало състояние, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; ρ_w – плътност на дървесината, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; r – координата на отделните точ-

ки на изчислителната мрежа по радиуса на трупите при численото решаване на модела (1) – (3), m; T – температура, K; T_{w0} – начална средномасова температура на подложените на размразяване трупи, K; T_m – температура на обработващата среда по време на размразяването, K; τ – време, s.

Дадените по-долу математични описания на $c_{w\text{-eff.1,2,3}}$, както и тези на $\lambda_{w\text{-eff.1,2}}$ и ρ_w в [3, 4, 6] са използвани при решаването на модела (1) – (3). Синхронно с изчисляването на нестационарното разпределение на температурата по радиуса на трупите е определяна тяхната средномасова температура по следното уравнение:

$$(4) \quad T_{\text{avg}}^n = \frac{1}{R} \int_R T(r, n \cdot \Delta\tau) dR,$$

където променливата n е текущият номер на стъпката по времевата координата $\Delta\tau$, с която се решава този модел

Стойностите на T_{avg} в момента на достигане на температура 0 °C в центъра на трупите се използват като индикатор за пълното им размразяване. Те са необходими

за изчисляване с уравнения (17) и (21) на една от компонентите на енергията, която е изразходвана до този момент за размразяване на трупите.

2.3. Математично описание на $c_{w\text{-eff.1,2,3}}$

Ефективните специфични топлинни капацитети на трупите по време на размразяването им $c_{w\text{-eff.1,2,3}}$, които участват в уравнение (1), са равни на [3, 29]:

$$(5) \quad c_{w\text{-eff.1}} = c_{w\text{-fr}} + c_{ice\text{-bw}} \\ \text{at } T_{w0} \leq T \leq 272.15K$$

$$(6) \quad c_{w\text{-eff.2}} = c_{w\text{-nfr}} + c_{ice\text{-fw}} \\ \text{at } 272.15K < T \leq 273.15K$$

$$(7) \quad c_{w\text{-eff.3}} = c_{w\text{-nfr}} \text{ at } T > 273.15K,$$

където $c_{w\text{-fr}}$ и $c_{w\text{-nfr}}$ са специфичните топлинни капацитети съответно на замръзналата и размразената дървесина, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; $c_{ice\text{-bw}}$ and $c_{ice\text{-fw}}$ – специфични топлинни капацитети на замръзналата съответно свързана и свободна вода в дървесината, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

В [5, 12] с използване на получени експериментални дисертационни данни от редица учени са направени следните математични описания на разглежданите капацитети:

$$(8) \quad c_{w\text{-fr}} = \left[1.06 + 0.04u + \frac{0.00075(T - 272.15)}{u_{fsp(272.15K)}} \right] \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 213.15K \leq T \leq 272.15K$$

$$(9) \quad c_{ice\text{-bw}} = \left(69.344T + 119.183T \cdot \ln \frac{T}{273.15} \right) \cdot \\ \left(u_{fsp(272.15K)} - 0.12 \right) \cdot \frac{\exp[0.0567(T - 272.15)]}{1 + u} \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 213.15K \leq T \leq 272.15K$$

$$(10) \quad c_{ice\text{-fw}} = 3.34 \cdot 10^5 \frac{u - u_{fsp(272.15K)}}{1 + u} \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 272.15K < T < 273.15K$$

$$(11) \quad c_{w\text{-nfr}} = \frac{1}{1 + u} \cdot \\ (2862u + 2.95T + 5.49u \cdot T + 0.0036T^2 + 555) \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 272.15K < T \leq 413.15K$$

където T е температурата, K ; u – съдържание на вода на дървесината в надхигроскопичния диапазон, $kg \cdot kg^{-1}$.

Участващата в уравнения (8) – (11) граница на хигроскопичност $u_{fsp(272.15K)}$ на конкретния дървесен вид при 272.15 K (т.е. при $-1^\circ C$) е равна на [3, 13, 24]

$$(12) \quad u_{fsp(272.15K)} = u_{fsp(293.15K)} + 0.021,$$

където $u_{fsp(293.15K)}$ е стандартизираната и налична в литературата стойност на границата на хигроскопичност на съответния дървесен вид при 293.15 K (т.е. при $20^\circ C$), $kg \cdot kg^{-1}$.

2.4. Модел на енергията, необходима за размразяване на трупите

Специфичната (спрямо $1 m^3$ дървесина) енергия $Q_{w\text{-defr}}$, която е необходима за пълно размразяване на трупите, може да се изчисли (в $kWh \cdot m^{-3}$) с помощта на следния модел [5, 12]:

$$(13) \quad Q_{w\text{-defr}} = Q_{w\text{-fr}} + Q_{ice\text{-bw}} + Q_{ice\text{-fw}} + Q_{w\text{-nfr}}$$

където $Q_{w\text{-fr}}$ е енергията, необходима за нагряване на замръзналата дървесина до състояние, в което може да се разтопи зависещата от t_{w0} част от леда, образувал се в нея от замръзването на свързаната вода; $Q_{ice\text{-bw}}$ – енергия, необходима за разтопяването на замръзналата свързана вода в дървесината; $Q_{ice\text{-fw}}$ – енергия, необходима за разтопяване на цялото количество замръзнала свободна вода в дървесината; $Q_{w\text{-nfr}}$ – енергия, необходима за нагряване на вече размразените периферни слоеве на трупите в момента на достигането на температура $0^\circ C$ в центъра на трупите.

Отделните стойности на компонентите на енергията $Q_{w\text{-defr}}$ могат да бъдат изчислени по следните уравнения [5, 12]:

$$(14) \quad Q_{w\text{-fr}} = \frac{\rho_w \cdot c_{w\text{-fr-avg}} \cdot (272.15 - T_{w0})}{3.6 \cdot 10^6} \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 213.15K \leq T_{w0} \leq 272.15K$$

$$(15) \quad Q_{ice\text{-bw}} = \frac{\rho_{ice} \cdot c_{ice\text{-bw-avg}} \cdot (272.15 - T_{w0})}{3.6 \cdot 10^6} \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 213.15K \leq T_{w0} \leq 272.15K$$

$$(16) \quad Q_{ice\text{-fw}} = \frac{\rho_{ice} \cdot c_{ice\text{-fw-avg}} \cdot (273.15 - 272.15)}{3.6 \cdot 10^6} \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 272.15K < T < 273.15K$$

$$(17) \quad Q_{w\text{-nfr}} = \frac{\rho_w \cdot c_{w\text{-nfr-avg}} \cdot (T_{avg\text{-end}} - 272.15)}{3.6 \cdot 10^6}, \\ \text{at } u > u_{fsp(272.15K)} \text{ \& } 272.15K < T_{avg\text{-end}} \leq 413.15K$$

където ρ_w и ρ_{ice} са плътностите съответно на дървесината и на леда в нея, $kg \cdot m^{-3}$, $T_{avg\text{-end}}$ – средномасова температура на трупите в момента на достигане на $0^\circ C$ в центъра им, K .

Множителят $3.6 \cdot 10^6$ в знаменателите на (14) – (17) осигурява получаване на изчислените стойности на Q в $kWh \cdot m^{-3}$, вместо в $J \cdot m^{-3}$.

Средномасовите специфични топлинни капацитети $c_{w\text{-fr-avg}}$, $c_{ice\text{-bw-avg}}$, $c_{ice\text{-fw-avg}}$ и $c_{w\text{-nfr-avg}}$ в (14) – (17) се изчис-

ляват по следните уравнения в зависимост от (8) – (11) и от температурата t_{w0} и съдържанието на вода u в дървесината:

$$(18) \quad c_{w-fr-avg} = \frac{c_{w-fr} \text{ at } T_{w0} + c_{w-fr} \text{ at } 272.15K}{2}$$

$$(19) \quad c_{ice-bw-avg} = \frac{c_{bw} \text{ at } T_{w0} + c_{bw} \text{ at } 272.15K}{2}$$

$$(20) \quad c_{ice-fw-avg} = c_{ice-fw} = 3.34 \cdot 10^5 \frac{u - u_{fsp}(272.15K)}{1 + u}$$

$$(21) \quad c_{w-nfr-avg} = \frac{c_{w-nfr} \text{ at } 272.15K + c_{w-nfr} \text{ at } T_{avg-end}}{2}$$

2.5. Решаване на моделите (1) – (3) и (13)

Математичните описания на температурата t_m и на топлофизичните характеристики на дървесината са въведени в модела (1) – (3) и той е решен с помощта на собствена софтуерна програма в изчислителната платформа Visual FORTRAN Professional на Microsoft.

Изчислено е изменението на T_m от началната ѝ стойност $T_{m0} = 283.15 \text{ K}$ (т.е. $t_{m0} = 10^\circ \text{C}$) до достигане и поддържане на максималната ѝ стойност в режимите за размразяване, равна на $T_{m1} = 353.15 \text{ K}$ (т.е. $t_{m1} = 80^\circ \text{C}$).

Изготвена е програма на Excel за едновременно решаване на уравненията (8) – (12) и (14) – (21) в модела (13). С нея е изследвано изменението на енергията Q_{w-defr} и на четирите ѝ компоненти за случаите на размразяване на букови трупи с начална температура $t_{w0} = -1, -10, -20, -30^\circ \text{C}$, -40°C и съдържание на вода 0.4, 0.6 и $0.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ при температура на нагряващата среда $t_{m1} = 80^\circ \text{C}$.

В симулациите като основни входни данни за параметрите на трупите и на режимите за размразяването им са използвани показаните такива в табл. 1.

Получените с модела (13) резултати за Q_{w-defr} са въведени като входни данни в софтуерния пакет Table Curve v.5.01, с помощта на който е извършено прецизно математично описание и графично представяне на зависимостта на Q_{w-defr} от началната температура и съдържанието на вода в трупите при размразяването им.

3. Резултати и анализ

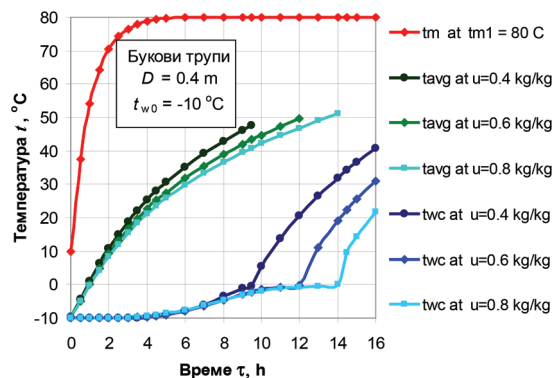
3.1. Изменение на температурата в подложените на размразяване трупи

На фиг. 2 и фиг. 3 е представено изчисленото с уравнения (1) – (4) изменение на температурата на нагряващата среда t_m , на средномасовата температура на трупите t_{avg} с начална температура съответно -10°C и -30°C , а също на температурата t_{wc} в тяхната централна точка по време на размразяването им в зависимост от влажността им u .

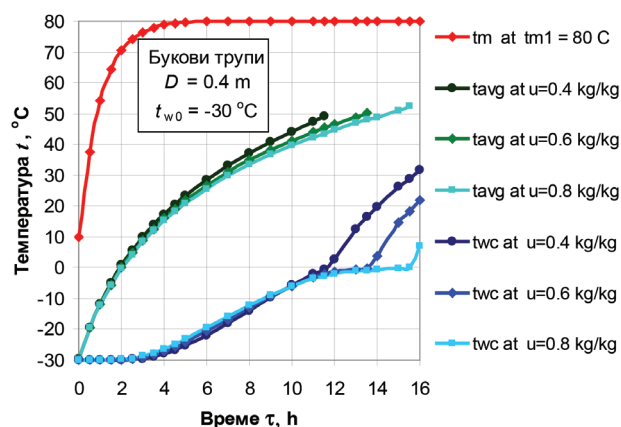
На фиг. 2 и фиг. 3 се вижда, че моментите на пълно

размразяване на трупите, т.е. на достигане на 0°C в центъра им, настъпват както следва:

- при трупи с $t_{w0} = -10^\circ \text{C}$: след 9.5, 12.0 и 14.0 h, когато u е съответно 0.4, 0.6 и $0.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- при трупи с $t_{w0} = -30^\circ \text{C}$: след 11.5, 13.5 и 15.5 h, когато u е съответно 0.4, 0.6 и $0.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Фиг. 2. Изменение на t_m , t_{wc} и t_{avg} при размразяване на трупи с $t_{w0} = -10^\circ \text{C}$ в зависимост от u



Фиг. 3. Изменение на t_m , t_{wc} и t_{avg} при размразяване на трупи с $t_{w0} = -30^\circ \text{C}$ в зависимост от u

В тези моменти средномасовата температура на трупите $t_{avg} = t_{avg-end}$ при всички изследвани комбинации между t_{w0} и u се оказва между 48 и 53°C , като тя намалява незначително с понижаването на t_{w0} и u . Като пример в позиция 13 на табл. 1 са дадени стойностите на $t_{avg-end}$ при трупи с $u = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ в зависимост от t_{w0} .

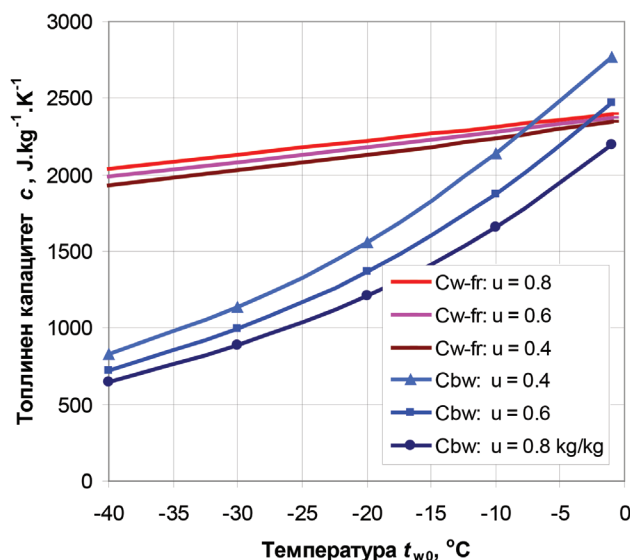
Получените стойности на $t_{avg-end}$ за всяка комбинация между t_{w0} и u са използвани при решаването на уравнения (13) и (21).

3.2. Изменение на специфичните топлинни капацитети на трупите

На фиг. 4 е показано изчисленото с (18) и (19) изменение на специфичните топлинни капацитети $c_{w-fr-avg}$ и $c_{ice-bw-avg}$ на подложените на размразяване трупи в зависимост от t_{w0} и u .

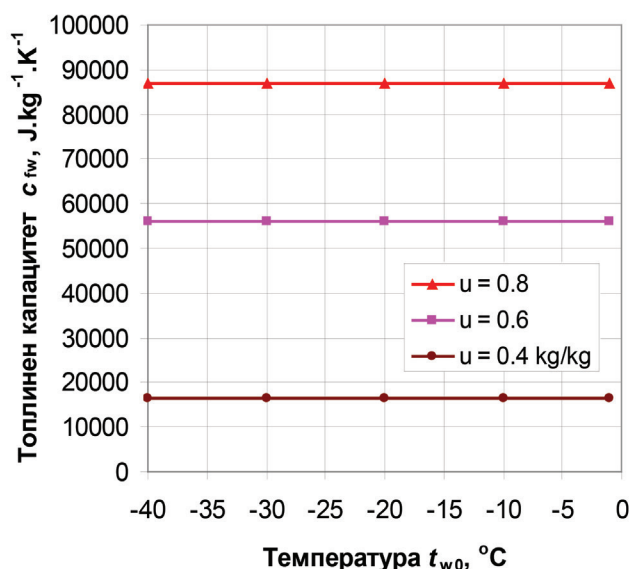
На фиг. 4 се вижда, че капацитетът $c_{w-fr-avg}$ намалява от около $2400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ до около $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ при

понижаване на t_{w0} от -1 до -40 °C, като той нараства незначително с увеличаването на u . Вижда се също, че капацитетът $c_{ice-bw-avg}$ при посоченото изменение на t_{w0} намалява от около $2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ до около $800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, като при това влиянието на u е обратно пропорционално.



Фиг. 4. Изменение на $c_{w-fr-avg}$ и $c_{ice-bw-avg}$ в зависимост от t_{w0} и u

На фиг. 5 и фиг. 6 е показано изчисленото с (20) и (21) изменение съответно на капацитетите $c_{ice-fw-avg}$ и $c_{w-nfr-avg}$ на подлежащите на размразяване трупи в зависимост от t_{w0} и u .

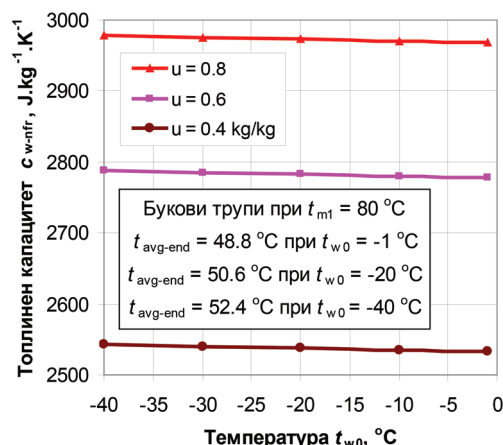


Фиг. 5. Изменение на $c_{ice-fw-avg}$ в зависимост от t_{w0} и u

На фиг. 5 се вижда, че капацитетът $c_{ice-fw-avg}$ е много голям и равен на 16700, 56360 и $87210 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ съответно при $u = 0.4, 0.6$ и $0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, като той не зависи от t_{w0} .

На фиг. 6 се вижда, че капацитетът $c_{w-nfr-avg}$ е равен на около 2530, 2780 и $2970 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ съответно при $u =$

$0.4, 0.6$ и $0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ и съвсем слабо нараства при понижаването на t_{w0} .



Фиг. 6. Изменение на $c_{w-nfr-avg}$ в зависимост от t_{w0} и u

3.3. Изменение на компонентите на енергията Q_{w-defr} в зависимост от t_{w0} и u

Изследвано е влиянието на показаните в табл. 1 стойности на началната температура t_{w0} и съдържанието на вода u на замръзнали букови трупи в надхигроскопичния диапазон върху отделните компоненти на енергията, необходима за тяхното размразяване.

В табл. 2 е дадено изчисленото с уравнение (14) изменение на енергията Q_{w-fr} (в $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) в зависимост от изследваните стойности на t_{w0} и u .

Табл. 2. Изменение на Q_{w-fr} в зависимост от t_{w0} и u

Начална температура на трупите t_{w0} , °C	Съдържание на вода в трупите u , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	0	0	0
-10	4.39	5.10	5.82
-20	8.82	10.29	11.79
-30	12.82	15.03	17.28
-40	16.43	19.33	22.27

От табл. 2 се вижда, че с понижаване на t_{w0} от -1 до -40 °C енергията Q_{w-fr} се повишава по следния начин:

- при $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 0 на $16.43 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 0 на $19.33 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 0 на $22.27 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

Причини за това изменение на Q_{w-fr} са, от една страна, повишаването на специфичния топлинен капацитет на самата замръзнала дървесина с нарастването на u (виж. фиг. 4) и, от друга страна – увеличаването на разликата $272.15 - T_{w0}$, която е дадена в скоби в дясната част на уравнение (14).

В табл. 3 е дадено изчисленото с уравнение (15) изменение на енергията Q_{ice-bw} в зависимост от t_{w0} и u .

Табл. 3. Изменение на Q_{ice-bw} в зависимост от t_{w0} и u

Начална температура на труците $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в труците $u, \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	0	0	0
-10	4.90	4.28	3.81
-20	7.56	6.61	5.88
-30	8.40	7.35	6.54
-40	8.21	7.19	6.39

От табл. 3 се вижда, че с понижаване на t_{w0} енергията Q_{ice-bw} се повишава от $0.0 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ при $t_{w0} = -1 ^\circ\text{C}$ за всички стойности на u до $8.21 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, $7.19 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ и $6.39 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ при $t_{w0} = -40 ^\circ\text{C}$ в случаите, когато u е равно съответно на $0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ и $0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Причини за това изменение на Q_{ice-bw} са намаляването на специфичния топлинен капацитет на замръзналата свързана вода в дървесината с нарастването на u (виж фиг. 4), а също увеличаването на разликата $272.15 - T_{w0}$ в десната част на уравнение (15).

В табл. 4 е дадено изчисленото с уравнение (16) изменение на енергията Q_{ice-fw} в зависимост от t_{w0} и u .

Табл. 4. Изменение на Q_{ice-fw} в зависимост от t_{w0} и u

Начална температура на труците $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в труците $u, \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1, -10, -20, -30, -40	4.19	14.30	22.17

От табл. 4 се вижда, че енергията Q_{ice-fw} не зависи от t_{w0} , но тя нараства с увеличаването на u от $4.19 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ при $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ на $14.30 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ при $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ и на 22.17 при $u = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Причина за това е силното нарастване на специфичния топлинен капацитет на замръзналата свободна вода в дървесината при увеличаването на u (виж. фиг. 5).

В табл. 5 е дадено изчисленото с уравнение (17) изменение на енергията Q_{w-nfr} в зависимост от изследваните стойности на t_{w0} и u .

От табл. 5 се вижда, че с понижаване на t_{w0} от -1 до $-40 ^\circ\text{C}$ енергията Q_{w-nfr} се повишава по следния начин:

- при $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 27.47 на $29.57 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 34.28 на $37.05 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 41.22 на $44.53 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

Причини за това изменение на Q_{w-nfr} са нарастването на специфичния топлинен капацитет на размразената дървесина с нарастването на u (виж фиг. 6), а също увеличаването на разликата $T_{avg-end} - 272.15$ в уравнение (17) с понижаването на t_{w0} .

Табл. 5. Изменение на Q_{w-nfr} в зависимост от t_{w0} и u

Начална температура на труците $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в труците $u, \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	27.47	34.28	41.22
-10	27.99	35.08	42.17
-20	28.52	35.74	42.96
-30	29.04	36.39	43.74
-40	29.57	37.05	44.53

4. Изчисляване с Table Curve 2D на разхода на енергия Q_{w-defr}

В табл. 6 е дадено изчисленото с модела (13) изменение на енергията Q_{w-defr} в зависимост от изследваните стойности на t_{w0} и u .

Табл. 6. Изменение на Q_{w-defr} в зависимост от t_{w0} и u

Начална температура на труците $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в труците $u, \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	31.66	48.56	63.39
-10	41.47	58.74	73.94
-20	49.09	66.92	82.77
-30	54.46	73.05	89.71
-40	58.39	77.85	95.33

От табл. 6 се вижда, че с понижаване на t_{w0} от -1 до $-40 ^\circ\text{C}$ енергията Q_{w-defr} се повишава по следния начин:

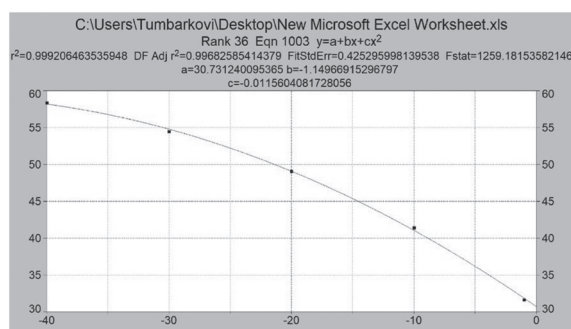
- при $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 31.63 на $58.37 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 48.56 на $77.85 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$;
- при $u = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$: от 63.36 на $95.33 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

Причини за констатираното изменение на Q_{w-defr} са увеличаването на ефективния специфичен капацитет на труците с повишаването на съдържанието на вода в тях, а също увеличаването на температурната разлика $272.15 - T_{w0}$ в десните части на уравнения (14) и (15) с понижаването на t_{w0} .

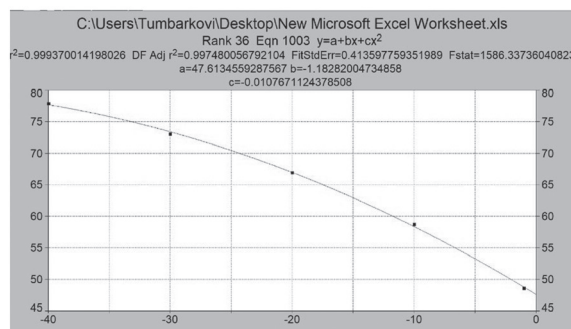
Наше изследване показва, че софтуерният пакет Table Curve 2D v.5.01 е много подходящ за прецизно апроксимиране на зависимостта на енергията Q_{w-defr} от началната температура t_{w0} и съдържанието на вода u на замръзналите трупи.

Този пакет позволява да се изберат от общо 3600 вида уравнения онези, които осигуряват най-добро съответствие между изчислените с тях стойности на Q_{w-defr} и съответстващите им такива, получени с модела (13).

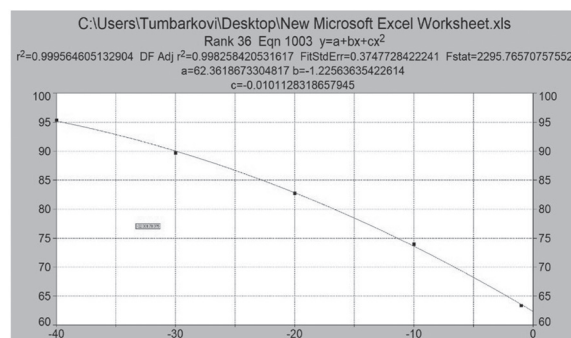
На фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9 са показани зависимости-те на Q_{w-defr} от t_{w0} , които са изчислени и построени с Table Curve по данните от табл. 6 съответно за $u = 0.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ и $0.8 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$.



Фиг. 7. Зависимост на Q_{w-defr} от t_{w0} при $u = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, изчислена и построена с Table Curve 2D



Фиг. 8. Зависимост на Q_{w-defr} от t_{w0} при $u = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, изчислена и построена с Table Curve 2D



Фиг. 9. Зависимост на Q_{w-defr} от t_{w0} при $u = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, изчислена и построена с Table Curve 2D

От тези фигури се вижда, че най-добро съответствие спрямо апроксимируемите данни от табл. 6 дава следното квадратно уравнение:

$$(22) \quad Q_{w-defr} = a + b \cdot t_{w0} + c \cdot t_{w0}^2,$$

където a , b и c са коефициенти, които софтуерът на Table Curve 2D изчислява с точност съответно до 12-я, 14-я и 16-я знак след десетичната точка.

След въвеждане в (22) на изчислените от Table Curve стойности на коефициентите a , b и c (с допустимото тяхно закръгляване спрямо изписаните им стойности горе в средата на фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9) се получават следните уравнения, апроксимиращи изменението на Q_{w-defr} в зависимост от t_{w0} и u :

$$(23) \quad Q_{w-defr} = 30.73 - 1.149 \cdot t_{w0} - 0.0116 \cdot t_{w0}^2$$

при $-1^\circ \text{C} \geq t_{w0} \geq -40^\circ \text{C}$ & $u = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$(24) \quad Q_{w-defr} = 47.61 - 1.183 \cdot t_{w0} - 0.0108 \cdot t_{w0}^2$$

при $-1^\circ \text{C} \geq t_{w0} \geq -40^\circ \text{C}$ & $u = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$(25) \quad Q_{w-defr} = 62.36 - 1.226 \cdot t_{w0} - 0.0101 \cdot t_{w0}^2$$

при $-1^\circ \text{C} \geq t_{w0} \geq -40^\circ \text{C}$ & $u = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

В табл. 7 е дадено изменението на енергията Q_{w-defr} , което е изчислено с уравнения (23), (24) и (25).

Табл. 7. Изменение на Q_{w-defr} в зависимост от t_{w0} и u , изчислено от Table Curve с уравнения (23)–(25)

Начална температура на трупите $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в дървесината $u, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	31.89	48.79	63.51
-10	41.15	58.36	73.61
-20	49.08	66.95	82.84
-30	54.78	73.38	90.08
-40	58.37	77.65	95.24

5. Точност на изчисляване с Table Curve 2D на енергията Q_{w-defr}

В табл. 8 е показано изменението на грешката δ при изчисляване u на енергията Q_{w-defr} с уравнения (23), (24) и (25) спрямо дадените в табл. 6 апроксимируеми стойности на енергията Q_{w-defr} в зависимост от t_{w0} и u .

Табл. 8. Изменение на грешката δ (в %) на изчисляване на енергията Q_{w-defr} с уравнения (23)–(25)

Начална температура на трупите $t_{w0}, ^\circ\text{C}$	Съдържание на вода в дървесината $u, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	0.4	0.6	0.8
-1	0.8	0.5	0.2
-10	-0.7	-0.6	-0.4
-20	0.1	0.1	0.1
-30	0.6	0.5	0.4
-40	-0.4	-0.3	-0.2

Анализът на данните в табл. 8 показва, че избраните с помощта на софтуерния пакет Table Curve 2D v.5.01 уравнения (23), (24) и (25) осигуряват много добра точност (в границите до 0.8%) на апроксимиране на изчисленото с модела (13) изменение на енергията Q_{w-defr} в зависимост от влияещите върху нея фактори t_{w0} и u .

6. Заключение

В настоящия труд е представено използване на софтуерния пакет Table Curve 2D v.5.01 за избор на вида и коефициентите на уравнения, които с голяма степен на съответствие апроксимират изчислено с наш температурно-енергиен модел изменение на енергията Q_{w-defr} , необходима за пълното размразяване на трупи преди последващото им механично обработване.

Избраните с този пакет уравнения описват изменението на Q_{w-defr} в зависимост от началната температура на съдържащите лед трупи t_{w0} при различни представляващи най-голям интерес за практиката, стойности на съдържанието на вода в тях u в надхигроскопичния диапазон.

С помощта на Table Curve 2D са избрани три квадратни уравнения, описващи най-добре изменението на Q_{w-defr} при размразяването на букови трупи с t_{w0} в диапазона от -1 °C до -40 °C и u , равно на 0.4, 0.6 и 0.8 kg·kg⁻¹. Видът на избраните уравнения е един и същи за трите изследвани стойности на u , а само стойностите на техните три коефициента са различни.

Важно предимство за прилагането на тези уравнения е използването в тях на обичайните за практиката Целзиеви градуси за началната температура на трупите вместо Келвиновите градуси за тази температура в модела (13).

Установено е наличието на съвсем малка грешка (в границите само до 0.8%) между изчислените с избраните с Table Curve 2D уравнения и апроксимиремите стойности на енергията Q_{w-defr} , установени с модела (13).

Получените резултати могат да бъдат използвани при разработването и автоматичното реализиране на научно обосновани енергийно ефективни режими и технологии за размразяване чрез топлинно обработване на съдържащи лед дървени материали с различни характеристики и с различно предназначение.

Представеният подход за математично описание на Q_{w-defr} може да бъде прилаган сравнително лесно и пряко други съдържащи лед капилярно-порести материали.

Литература

1. Chudinov, B. S. Theory of Thermal Treatment of Wood. Moscow, Nauka, 1968, 255 (in Russian).
2. Câmpean, M. Heat Treatments of Wood. Braşov, Transilvania University of Braşov, Romania, 2005, 199 (in Romanian).
3. Deliiski, N. Modelling and Technologies for Steaming Wood Materials in Autoclaves. Dissertation for DSc. University of Forestry, Sofia, 2003, 358 (in Bulgarian).
4. Deliiski, N. Transient Heat Conduction in Capillary Porous Bodies. In Ahsan A. (Ed) Convection and Conduction Heat Transfer. Rieka, InTech Publishing House, 2011, 149-176.
5. Deliiski, N. Modelling of the Energy Needed for Heating of Capillary Porous Bodies in Frozen and Non-Frozen States. Scholars' Press, Saarbrücken, Germany, 2013, 116.
6. Deliiski, N. and L. Dzurenda. Modelling of the Thermal

Treatment in the Technologies for Wood Processing. University of Forestry, Sofia, 2010, 299 (in Bulgarian).

7. Dzurenda, L. and N. Deliiski. Thermal Processes in the Woodworking Technologies. Technical University in Zvolen, Slovakia, 2019, 283 (in Slovak).
8. Hadjiski, M. and N. Deliiski. Advanced Control of the Wood Thermal Treatment Processing. – *Cybernetics and Information Technologies*, 16, 2016, No. 2, 179-197.
9. Hadjiski, M. and N. Deliiski. Advanced Process Control of Distributed Parameter Plants by Integration First Principle Modeling and Case-Based Reasoning. Part 2: Case-Based Reasoning Control of DPP. Proc. of the Int. Conf. of Automatics and Informatics John Atanasoff, Varna, 1-3 October 2020, 6.
10. Hadjiski, M., N. Deliiski and A. Grancharova. Spatiotemporal Parameter Estimation of Thermal Treatment Process via Initial Condition Reconstruction Using Neural Networks. In Hadjiski, M, Atanasov, K. T. (Eds). Intuitionistic Fuzziness and Other Intelligent Theories and Their Applications. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2019, 51-80.
11. Hadjiski, M., N. Deliiski, and N. Tumbarkova. Intelligent Hybrid Control of Thermal Treatment Processes of Wood. Proc. of the 10th Int. Conf. on Intelligent Systems IS 2020, Varna, 26-28 August 2020, 482-498.
12. Hadjiski, M., N. Deliiski, D. Angelski, P. Vitchev and K. Atanasova. Calculation of the Energy and its Components Required for Plasticizing of Ice-Containing Logs in Veneer Production. – *Automatica and Informatics*, 57, 2024, 2, 6-13 (in Bulgarian).
13. Hřečka, R. and M. Babiak. Wood Thermal Properties. In G. Consu (Ed) Wood in Civil Engineering. London, InTechOpen, 2017, 25-43.
14. Khattabi, A. and H. P. Steinhagen. Numerical Solution to Two-Dimensional Heating of Logs. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 50, 1992, 7-8, 308-312.
15. Khattabi, A. and H. P. Steinhagen. Analysis of Transient Non-linear Heat Conduction in Wood Using Finite-difference Solutions. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 51, 1993, 4, 272-278.
16. Kollmann, F. F. and W. A. Jr. Côté. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood New York: Springer-Verlag, 1984, 592.
17. Lawniczak, M. Hydrothermal and Plasticizing Treatment of Wood. Part I. Boiling and Steaming of Wood. Poznan, Poland, Agricultural Academy, 1995, 149 (in Polish).
18. Niemz, P., A. Teischinger and D. Sandberg (Eds.). Springer Handbook for Wood Science and Technology. Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2023, 2069.
19. Niemz, P., A. Teischinger and D. Sandberg (Eds.). Wood Material and Processing Data. Cham. Springer Nature Switzerland AG, 2025, 289.
20. Pervan, S. Technology for Treatment of Wood with Water Steam. University in Zagreb, Zagreb, 2009 (in Croatian).
21. Sgurev, V., M. Hadjiski and N. Deliiski. Multicriteria Optimal Control of Industrial Thermal Processes with Distributed Parameters under Variable Operational Conditions. In: Complex Systems: Spanning Control and Computational Cybernetics: Applications, Dedicated to Professor Georgi M. Demirovski on his Anniversary – Studies on Systems Decision and Control. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 2022, 24.
22. Shubin, G. S. Drying and Thermal Treatment of Wood. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 1990, 337 (in Russian).
23. Sohor, M. and P. Kadlec. Hydrothermal Treatment of Wood for Production of Veneer. – *Drevo*, № 2, 1990 (in Slovak).

24. Stamm, A. J. Wood and Cellulose Science. Ronald Press, New York, 1964.
25. Steinhagen, H. P. Computerized Finite-Difference Method to Calculate Transient Heat Conduction with Thawing. – *Wood Fiber Science*, 18, 1986, 3, 460-467.
26. Steinhagen, H. P. Heat Transfer Computation for a Long, Frozen Log Heated in Agitated Water or Steam – A Practical Recipe. – *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49, 1991, 7-8, 287-290.
27. Steinhagen, H. P. Veneer Block Conditioning Manual for Veneer and Plywood Production. – *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7, 2005, 1, 49-56.
28. Trebula, P. and I. Klement. Drying and Hydrothermal Treatment of Wood. Technical University in Zvolen, Slovakia, 2002, 449 (in Slovak).
29. Tumbarkova, N. Modelling of the Freezing and Defrosting Processes of Logs and Their Energy Consumption. Thesis (PhD). Sofia, University of Forestry, 2019, 198 (in Bulgarian).
30. Videlov, H. Drying and Thermal Treatment of Wood. University of Forestry, Sofia, 2003, 255 (in Bulgarian).

За контакти:

Акад. д.т.н. проф. **Минчо Хаджийски**
 Институт по информационни
 и комуникационни технологии
 Българска академия на науките
 ул. Акад. Г. Бончев, блок 2, 1113 София
zdravkah@abv.bg

Проф. д.т.н. **Ненчо Делийски**
 Катедра „Дървообработващи машини“
 Факултет по горска промишленост
 Лесотехнически университет – София
 бул. Св. Климент Охридски 10, 1797 София
deliiski@netbg.com

Маг.-инж. д-р **Наталия Тумбаркова**
 Катедра „Дървообработващи машини“
 Факултет по горска промишленост
 Лесотехнически университет – София
 бул. Св. Климент Охридски 10, 1797 София
ntumbarkova@abv.bg

Проф. д-р **Димитър Ангелски**
 Катедра „Производство на мебели“
 Факултет по горска промишленост
 Лесотехнически университет – София
d.angelski@gmail.com

Доц. д-р **Павлин Вичев**
 Катедра „Дървообработващи машини“
 Факултет по горска промишленост
 Лесотехнически университет – София
p_vitchev@abv.bg

Гл. ас. д-р **Красимира Атанасова**
 Катедра „Производство на мебели“
 Факултет по горска промишленост
 Лесотехнически университет – София
k.atanasova@lt.bg

info.com
infobg.info

bginfo.com
infobg.com

bgspravka.info
bgspravka.com

БЯХТЕ ЛИ В
 НОВИЯ ИНФОРМАЦИОНЕН САЙТ
 НА БЪЛГАРИЯ?

софсправка®
 национална информационна система

www.sofspravka.com

АБОНИРАЙТЕ СЕ!

Обзор на интелигентни референтни рамки, архитектури и модели в системите за енергиен мениджмънт

П. Кесова, И. Бачкова

Overview of Intelligent Reference Frameworks, Architectures and Models in Energy Management Systems

P. Kesova, I. Bachkova

Department of Industrial Automation, University of Chemical Technology and Metallurgy, 8 Kliment Ohridski Blvd., 1756 Sofia, Bulgaria, p.krasimirova@gmail.com, idilia@uctm.edu

Key Words: Energy Management Systems; Reference Architectures; Reference Frameworks; Conceptual Models; Semantic Interoperability; Unified Information Models; Industry 4.0; ISO 50001; SGAM; IIRA; OPC UA; IEC 62264.

Abstract. Achieving the objectives of the Industry 4.0 initiative, particularly in relation to the implementation of Energy Management Systems (EnMS) in industry, depends on the structured adoption of reference frameworks, architectures, and models capable of ensuring interoperability, scalability, and continuous enhancement of energy efficiency. In recent years, concepts such as reference frameworks and architectures, conceptual models, ontologies, meta-models, and unified information models have become increasingly prominent in the development and deployment of Energy Management Systems (EnMS). Nevertheless, their simultaneous application frequently results in conceptual uncertainty and overlapping interpretations. The growing use of these concepts requires a clear understanding of their meaning, scope, and interrelationships. This paper presents an overview of intelligent reference frameworks, architectures, and models applied in the development and implementation of industrial energy management systems. The relationships between models, reference frameworks, and architectures are analyzed, with a particular emphasis on clarifying the conceptual distinctions between conceptual models, reference models, meta-models, and meta-meta-models. Building on this analysis, the paper reviews several widely recognized standards and architectural frameworks, including ISO 50001, the Smart Grid Architecture Model (SGAM), the Industrial Internet Reference Architecture (IIRA), OPC Unified Architecture (OPC UA), and the IEC 62264 standard for enterprise control system integration. The paper highlights the contribution of reference architectures to the systematic structuring of complex energy management solutions, and emphasizes the essential role of unified information models in enabling semantic interoperability across heterogeneous systems. The practical relevance, advantages, and constraints of the examined frameworks are evaluated with respect to industrial energy management, real-time monitoring, data-driven optimization, and their integration within intelligent manufacturing environments. The study concludes that reference frameworks and architectures

should be viewed as complementary layers of a unified knowledge system: frameworks provide methodological context, architectures define structural organization, models describe functional behavior, and unified information models ensure consistent data representation and exchange. This integrated approach is identified as a key enabler for the development of intelligent, adaptive, and sustainable energy management systems, supporting the transition toward Industry 5.0 and human-centric, energy-efficient industrial environments.

1. Въведение

Референтните рамки, архитектури и модели предоставят структурирани подходи за проектиране и внедряване на ефективни индустриални системи за енергиен мениджмънт, осигурявайки оперативна съвместимост, мащабируемост и непрекъснато подобряване на енергийната ефективност. Тенденциите в развитието на системите за енергиен мениджмънт са насочени към включване на иновациите в областта на интернет на нещата (IoT), технологиите за изкуствен интелект (AI) и машинно обучение (ML). Тези технологични скокове обещава да въведат нова ера на усъвършенствани възможности за анализ и автоматизация, проправяйки пътя към по-интелигентни, адаптивни и ефективни методологии за енергиен мениджмънт.

Цел на тази статия е да обобщи знанията в областта на съществуващите референтни рамки, архитектури и модели, използвани в процеса на разработка и приложение на системите за енергиен мениджмънт. След въведението, в раздел 2 е представен анализ на понятията референтни рамки, архитектури и модели и връзката между тях. В част 3 са представени накратко едни от най-подходящите за използване в областта на системите за енергиен мениджмънт референтни рамки, архитекту-

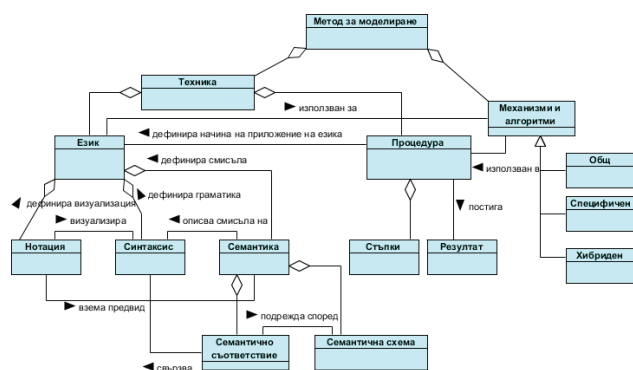
ри и модели. Част 4 представя някои изводи относно приложимостта на анализирания референтни рамки, архитектури и унифицирани информационни модели.

2. Анализ на понятията модели, референтни рамки и архитектури

2.1. Модели и методи за моделиране

Понятието *модел* се дефинира най-общо като абстракция на част от реалния свят за определени цели, която се изразява чрез език за моделиране. Разнообразието от модели се обуславя освен чрез разнообразието в реалния свят и разнообразието от моделирани аспекти, така също и от множеството предлагани методи за моделиране. Една от най-важните дейности при създаването на модели е изборът на метод за моделиране. На *фиг. 1* е представен метамодел на метода за моделиране, според който всеки метод за моделиране включва език за моделиране и процедури, а също така и механизми и алгоритми.

Езикът за моделиране включва елементи, посредством които може да се опише моделът. За целта всеки един език е дефиниран посредством синтаксис, семантика и нотации. Синтаксисът описва елементите и правилата за създаване на модели и се описва чрез граматика, като съществуват два основни подхода за дефиниране на синтаксис: графични граматиките и метамодели. Абстрактният синтаксис се състои само от структури, за разлика от конкретния синтаксис, който включва информация за конкретното представяне или кодиране. И именно абстрактният синтаксис се свързва с понятието концептуализация, която е абстрактен, опростен поглед върху избрана част от света чрез обекти, понятия и други същности и връзките между тях, свързани с определена цел и наличието на ограничения. За разлика от концептуализацията, абстракцията се отнася до скриване на маловажни подробности с цел да се акцентира върху основните характеристики.



Фиг. 1. Метамодел на метод за моделиране

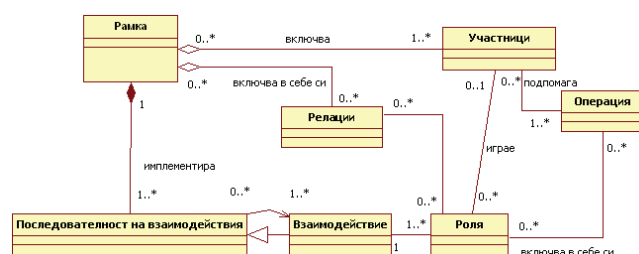
Концептуализацията води до създаване на концептуален модел, който е препоръчителен модел, представящ съвкупност от същности (артефакти) чрез набор от

понятия, връзките между тях и ограничения при предположение за *затворена среда*. Затворената среда е понятие на формалната логика, което предполага, че това, което в момента не е известно да е истина, е невярно. Метамоделът е концептуален модел на езика за моделиране. Езикът за моделиране е добре разбираем език (невинаги формален), който описва понятията на част от реалността и техните връзки. Мета-метамоделът е модел на езика за метамоделиране, който може да се използва за изразяване на метамодели. Моделът на езика за моделиране на мета-метамодели се изразява чрез самия себе си. Мета-метамоделът е концептуален модел на езика за метамоделиране. Важно е да се направи разграничение между мета- и мета-метамоделите, от една страна, и т. нар. референтни модели, от друга.

Референтните модели са общовалидни концептуални модели, които формализират препоръчителната практика в определена област. Основна задача на референтните модели е да ускорят (рационализират) проектирането на различни по вид модели посредством общо решение. Използването на референтни модели се мотивира от парадигмата за проектиране чрез многократно използване. Референтните модели ускоряват процеса на моделиране посредством създаването на склад от модели за важни процеси и структури. Когато се сравняват модели на едно и също ниво за връзка между моделите може да бъде използван референтен модел, към който могат да бъдат съпоставяни (mapped) различни модели от същото ниво.

2.2. Референтни рамки и архитектури

Термините *референтна рамка* и *референтна архитектура* са дефинирани официално в стандарта ISO/IEC/IEEE 42010:2011 и актуализираната му версия ISO/IEC/IEEE 42010:2022 [2]. Рамката се разглежда като логическа структура за класификация и организиране на сложна информация. Референтната рамка или още наричана архитектурна рамка, е съвкупност от предварително дефинирани гледни точки, интереси, основни заинтересовани лица и правила за съответствие на гледните точки, които са установени, за да уловят обичайната практика за описание на архитектурата в определени области или потребителски общности [3]. Метамоделът на референтна рамка е представен на *фиг. 2*.



Фиг. 2. Метамодел на референтна рамка

Стандартът ISO/IEC/IEEE 42010:2022, отнасящ се до препоръчителната практика за описание на архитектурата на интензивни по отношение на софтуера системи, дефинира архитектурата като фундаментална организация на системата, състояща се от компоненти, релациите между тях и към средата, която ги заобикаля, както и принципите, които са в основата на тяхното проектиране и разработка. Основен елемент на концептуалната рамка на една архитектура съгласно стандарта е изгледът (view), който се дефинира като описание на дадена система от перспективата на множество от свързани понятия. Като такъв изгледът се състои от един или повече модели. Референтната архитектура е стандартизирана, обща архитектура, описваща всички системи в конкретна област, базира се на ограничения в референтните изисквания, специфицира синтаксиса и семантиката на компонентите от високо ниво. Тя е многократно използвана, разширяема и конфигурируема, представлява основата за създаване на частични (многократно използвани) и специфични архитектури и модели. Елементите на референтната архитектура са: модел (топология), конфигурация, схема на архитектурата, диаграма на зависимостите, описание на интерфейсите между компонентите, ограничения. Референтните архитектури са интелектуални парадигми, които подпомагат анализа, правилната дискусия и спецификация на дадена област. Референтните архитектури са два основни типа. Архитектурата от тип 1 представлява явно описание или модел на физическата организация или структура на системата. Архитектурата от тип 2 описва или моделира стъпките на процеса на разработка на интегрираните системи на предприятието.

3. Референтни рамки и архитектури в системите за енергиен мениджмънт

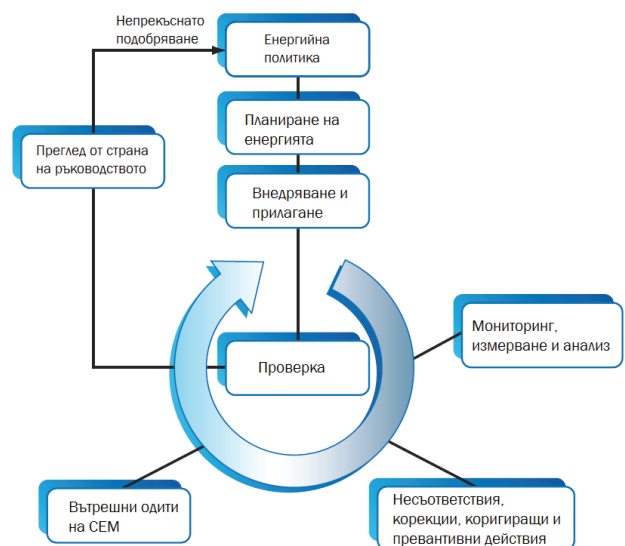
Референтните архитектури за индустриалните системи за енергиен мениджмънт (IEnMS) предоставят структурирани рамки и най-добри практики за проектиране, внедряване и управление на решения за енергиен мениджмънт в индустриални условия. Тези архитектури имат за цел да оптимизират потреблението на енергия, да подобрят ефективността и да намалят разходите за производството на единица продукция. В областта на системите за енергиен мениджмънт приложение са намерили следните по-известни референтни рамки, архитектури и унифицирани информационни модели.

3.1. Рамка, базирана на стандарта ISO 50001

ISO 50001 [4] предоставя рамка за създаване, прилагане, поддръжка и подобряване на системите за енергиен мениджмънт. Тя има за цел да подпомогне организацията в стремежа им към непрекъснато подобряване на енергийна ефективност, включително енергий-

на ефективност, използване и потребление. Ключовите компоненти на рамката са: (1) Разработване на енергийна политика; (2) Енергийно планиране; (3) Внедряване и експлоатация; (4) Оценка на изпълнението; (5) Преглед на ръководството.

Прилагането на цикъла ПИПД (Планиране – Изпълнение – Проверка – Действие) позволява на потребителите да подобряват непрекъснато резултатите си, свързани с енергопотреблението, както е видно от *фиг. 3*. При първоначално въвеждане на системата на практика този цикъл е недостатъчен. В този случай процесът стартира със заявяване на ясен ангажимент от страна на ръководството на организацията за оценка на съществуващата ситуация и осигуряване на необходимите ресурси за това.

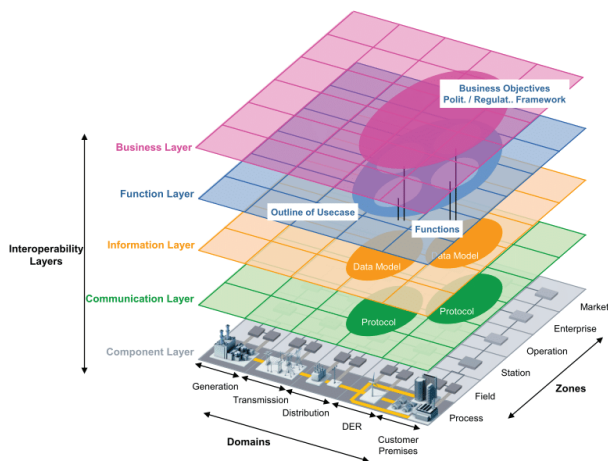


Фиг. 3. Концептуална рамка за внедряване на EnMS [4]

3.2. Архитектурен модел на интелигентна мрежа (SGAM)

SGAM [5] е цялостна рамка, използвана за проектиране и анализ на интелигентни мрежови решения, която може да бъде адаптирана за индустриален енергиен мениджмънт. Тя представлява тримерен референтен модел, който комбинира хоризонтални слоеве оперативна съвместимост (Interoperability Layers), вертикални зони (Zones) и домейни по енергийния поток (Domains) и е показана на *фиг. 4*. В най-долната част на слоя за оперативна съвместимост е разположен компонентният слой (Component Layer), който отразява физическия свят – реалните устройства и съоръжения. На *фиг. 4* този слой е свързан с домейните Generation, Transmission, Distribution, DER и Process, което показва, че физическите компоненти съществуват по цялата енергийна верига – от производството до крайния процес при потребителя. Над компонентния слой се намира комуникационният слой (Communication Layer), който описва комуникации-

те между физическите устройства и тези с горните нива. На *фиг. 4* това е илюстрирано чрез протоколи (Protocols) и разграничението между нивата: поле (field), станция (station) и предприятие (enterprise). В следващия информационен слой (Information Layer), сигналите се превръщат в информация, т.е. придобиват смисъл. В този слой се дефинират моделите на данни (Data Models) за описание на измервания, състояния или събития, постигайки семантична съвместимост. Следва функционалният слой (Function Layer), на който са разположени логиката и интелигентността на системата, изразени в алгоритми, функции, случаи на употреба и други. На *фиг. 4* това е показано чрез функции (Functions) и обобщения на случаите на употреба (Outline of use Cases), което подчертава, че функциите винаги са свързани с конкретни случаи на употреба. Най-отгоре се намира бизнес слойът (Business Layer), който дава смисъл на всичко останало. Тук се дефинират бизнес целите, регулаторните изисквания, политиките и пазарните правила. На *фиг. 4* този слой е означен като Business Objectives (бизнес цели) и Policies & Regulations (политики & регулации). Когато трите измерения (слоеве, зони и домейни) се комбинират, SGAM позволява всяка част от системата да бъде ясно позиционирана.

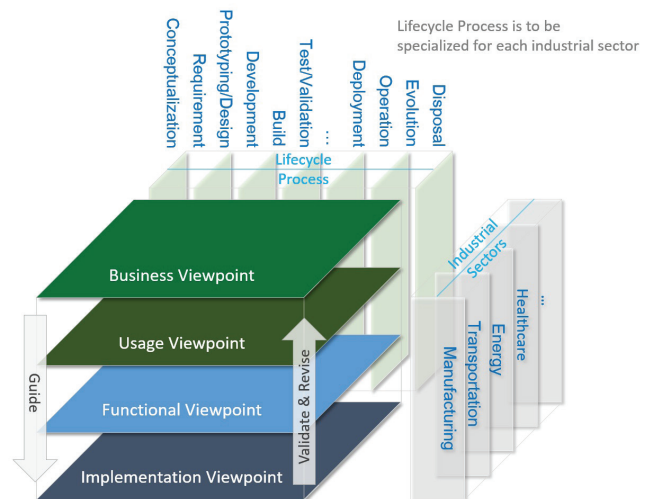


Фиг. 4. Архитектурен модел на SGAM [5]

3.3. Референтна архитектура на Консорциума за индустриален интернет (ИИ)

Референтната архитектура на системите за ПоТ (ИРА) [6] е разработена от Консорциума за индустриален интернет (ИИ) и дефинира рамката на архитектурата на интернет на нещата (IIAF), която съдържа информация, идентифицираща фундаменталните структури на архитектурата и специфицира интересите, заинтересованите страни, гледните точки, видовете модели, правилата за съответствие и условията за приложимост, като подпомага разработката, изготвянето на документацията и комуникацията на ИРА. ИРА предлага отворена архитектура, базирана на стандарти и използва общ реч-

ник. В центъра на модела е жизненият цикъл (Lifecycle Process), който, както е показано на *фиг. 5*, трябва да бъде специализиран за всеки индустриален сектор. Този жизнен цикъл обхваща всички етапи – от концептуализацията (Conceptualization), изискванията (Requirements) и проектирането (Prototyping/Design), през разработката (Development), изграждането (Build), тестване/валидация (Test/Validation) и внедряването (Deployment), до експлоатацията (Operation), поддръжката (Evolution) и извеждането от употреба (Disposal). ИРА подчертава, че архитектурните решения не са еднократен акт, а се развиват заедно със системата през целия ѝ жизнен цикъл. В рамките на този жизнен цикъл архитектурата се представя с четири изгледа (Viewpoints), подредени на *фиг. 5* като слоеве. Най-отгоре се намира бизнес изгледът (Business Viewpoint), който описва системата от гледна точка на бизнеса и заинтересованите страни. Тук се дефинират бизнес целите, очакваната стойност, икономическите ползи, регулаторните ограничения и ключовите показатели за ефективност. Под него е изгледът на употреба (Usage Viewpoint), който свързва бизнес целите с реалната употреба на системата. Тук се описват основните сценарии на използване (use cases), ролите на участниците и взаимодействията между тях. Този изглед показва как различни потребители, системи или организации използват решението в реални ситуации.

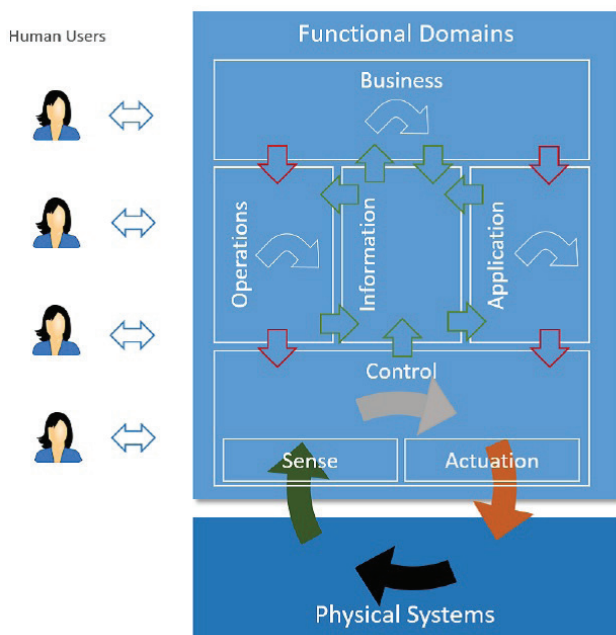


Фиг. 5. Референтна архитектура ИРА [6]

На *фиг. 5* този изглед играе ролята на преход между бизнес намеренията и техническата логика. Следва функционалният изглед (Functional Viewpoint), в рамките на който системата се разглежда като съвкупност от функции и логически компоненти. Тук се дефинират функциите, които трябва да изпълнява системата, как те си взаимодействат и какви отговорности имат. Този слой не се интересува от конкретни технологии, а от логиката – обработка на данни, анализ, управление, координация между подсистемите. Най-отдолу е изгледът за имплементация (Implementation Viewpoint), където функционалните решения се превръщат в кон-

кретна техническа архитектура. В този изглед се описват реалните технологии, платформи, комуникации, хардуер и софтуер, чрез които системата се реализира. От дясната страна на *фиг. 5* е показана третата размерност, която представя индустриалните сектори производство (Manufacturing), енергетика (Energy), транспорт (Transportation), здравеопазване (Healthcare) и други, за които се специализират жизненият цикъл и архитектурните изгледи.

Функционалната гледна точка представя различната функционалност на IoT базираната система. Декомпозицията ѝ във функционални домейни има за цел да структурира най-важните градивни елементи, като поставя началото на концептуализацията на конкретна функционална архитектура. Декомпозицията е силно повлияна от специфичните системни изисквания. Типичната IoT базирана система се декомпозира в следните функционални домейни: (1) Измерване (Sense); (2) Управляващи въздействия (Actuation); (3) Управление (Control); (4) Оперативно управление (Operations); (5) Информация (Information); (6) Приложение (Application) и (7) Бизнес (Business), както е показано на *фиг. 6*. Потоците на данни (зелени стрелки на *фиг. 6*) и управляващите потоци (червени стрелки на *фиг. 6*) протичат във и между тези функционални домейни. Оставащите хоризонтални стрелки показват обработка на данни, при която се генерират нови данни или управляващи потоци. Управлението, координацията и оркестрацията, упражнявани във всяка една функционална област, се отличават с различна степен на детайлност и времеви цикли

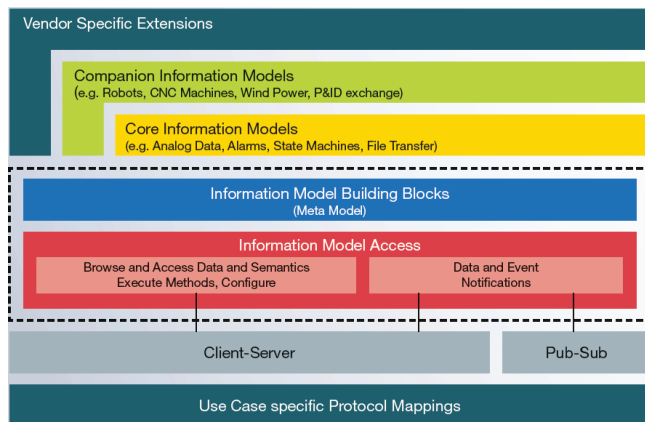


Фиг. 6. Функционални домейни [6]

3.4. Отворена унифицирана архитектура за комуникации (OPC UA)

Стандартът IEC 62541, известен още като OPC UA (Open Platform Communication – Unified Architecture) [7] дефинира унифициран инфраструктурен модел за обмен на информация между компоненти (сензори, механизми, системи за управление) и системи (MES, ERP) в индустрията. OPC UA поддържа следните спецификации: информационен модел за представяне на структура, поведение и семантика; моделиране на съобщения за взаимодействия между приложения и комуникационен модел за пренос на данни между крайни точки. Стандартът присъства в референтната архитектура RAMI [8] на Индустрия 4.0, като е посочен като единствения препоръчителен за имплементации комуникационен стандарт. На *фиг. 7* е показана референтната архитектура на OPC UA, представена като слоеста структура от модели и механизми за достъп до информация. В най-долната част на архитектурата се намира слойът на протоколните съответствия за конкретни сценарии на употреба (Use Case Specific Protocol Mappings), който позволява адаптацията към различни индустриални среди и изисквания. Непосредствено над него е разположен слойът, който дефинира основните комуникационни модели в OPC UA. Клиент-сървър моделът (Client-Server) се използва, когато е необходим директен достъп до данни и услуги – например четене, запис или извикване на методи. Паралелно на него е моделът Publish-Subscribe (Pub-Sub), който е подходящ за разпространение на данни и събития към множество получатели в реално време. Този слой показва, че OPC UA поддържа и двата подхода като равноправни. Над комуникационните модели се намира слойът за достъп до информационните модели (Information Model Access). Това е ключов слой, който дефинира как приложенията взаимодействат с информационния модел. Тук са включени два основни типа достъп. От едната страна е възможността да се навигира в адресното пространство, да се разбират връзките между обектите и смисъла на данните (Browse and Access Data and Semantics). От другата страна е слойът за достъп до методи и конфигурационни функции (Execute Methods, Configure). Паралелно с това слойът поддържа и уведомления за данни и събития (Data and Event Notifications), което позволява асинхронно получаване на промени и събития. Над достъпа до информация са разположени базовите елементи на информационния модел (Information Model Building Blocks) – типове данни, обекти, атрибути, референции и събития. Тук се дефинира общият език, чрез който OPC UA описва реалния свят по структуриран и машинно разбираем начин. Това е фундаментът, върху който се изграждат всички по-специфични модели. Следва слойът на основните информационни модели (Core Information Models), включващ стандартни модели, дефинирани от OPC Foundation, които покриват основни индустриални понятия – например данни от аналогови и дискретни сигнали, аларми, състояния, машини и обмен на файло-

ве. Те осигуряват базовата оперативна съвместимост и позволяват различни системи да „говорят на един език“ без допълнителни договорки. Над тях се намира слой на съпътстващите информационни модели (Companion Information Models), които представляват разширения на основните модели, създадени за конкретни индустрии или типове оборудване. Най-отгоре на архитектурата е слой на разширенията, специфични за конкретен производител (Vendor Specific Extensions), който позволява на производителите да добавят собствени разширения и специфични характеристики, без да се наруши съвместимостта с основния стандарт.



Фиг. 7. Архитектура на OPC A [7]

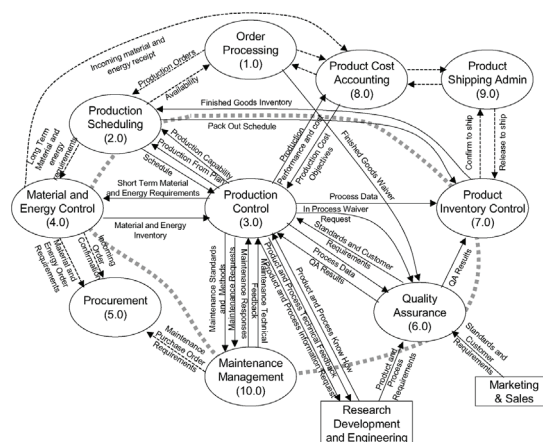
3.5. Референтен модел на стандарта IEC 62264

IEC 62264 [9] е международен стандарт за интегриране на системите за управление на производството със системите за управление на бизнеса. Той представлява споразумение между водещи фирми за създаване на обща рамка и насоки за проектиране и интеграция на системи и цели стандартизация на обмена на информация между системите на бизнес ниво и тези на ниво оперативно управление на производството. Моделите и терминологията, дефинирани в стандарта, отразяват най-добрите практики в интеграцията на тези системи. Ключовите модели на рамката са:

- Йерархичен модел на планиране и управление;
- Йерархичен модел на оборудването;
- Функционален модел на оперативното управление.

На фиг. 8 е представен функционалният модел на оперативното управление според стандарта IEC 62264, който показва основните функции на ниво производство и потоците информация между тях. В центъра на модела е функцията за управление на производството (Production Control), която представлява ядрото на оперативното управление. Тук се координира реалното изпълнение на производствените поръчки – стартиране, спиране, проследяване на статуса, управление на ресурси и събиране на данни от процеса. Над него е разположена функция-

та за детайлно планиране на производството (Production Scheduling) – кога, къде и с какви ресурси се изпълняват поръчките. Тук се вземат предвид наличните мощности, материали, персонал и ограничения. В горната част на фиг. 8 е разположена функцията за обработка на поръчките (Order Processing), където клиентските поръчки се превръщат в производствени поръчки. От дясната страна на диаграмата е функцията, която управлява наличностите от готова продукция (Product Inventory Control), включващи количествата, местоположението и статуса им. Над нея се намира функцията за администриране на експедицията (Product Shipping Administration), която управлява подготовката на доставки, транспорт и предаване на готовата продукция към клиента. В лявата част на фиг. 8 е показана функцията за управление и проследяване на суровини, материали и енергия (Material and Energy Control), необходими за производството. Под нея е функцията по снабдяване (Procurement), която се занимава с доставчици, заявки за материали и попълване на складовите наличности. В долната централна част се намира функция за управление на поддръжката (Maintenance Management), касаеща планираната и аварийна поддръжка на оборудването. От дясната страна под управлението на производството е функцията по осигуряване на качеството (Quality Assurance), която отговаря за контрола и осигуряването на качеството – инспекции, тестове, отклонения и коригиращи действия. В долната дясна част е развойната дейност (Research & Development), която използва данни от производството, качеството и поддръжката за подобряване на продукти и процеси. Макар да не участва директно в ежедневно управление, тя е важен потребител на производствена информация. От дясната страна извън основния кръг е показана функцията маркетинг и продажби (Marketing & Sales), представляваща бизнес средата, която подава изисквания и получава обратна информация за изпълнение, срокове и качество. Стрелките между отделните функции показват двупосочни потоци от информация – планове, заявки, резултати, състояния и отчети.



Фиг. 8. Функционален модел на оперативното управление съгласно IEC 62264 [9]

4. Основни изводи

При разработването на индустриални системи за енергиен мениджмънт могат да се използват няколко референтни рамки, архитектури и унифицирани модели, всеки от които предлага уникални предимства, съобразени с различен индустриален контекст. Силната страна на рамката, базирана на стандарта ISO 50001, е, че предлага цялостен и систематичен подход към енергийния мениджмънт, приложим за всяка индустрия, като помага на организацията да постигнат нормативно съответствие. Референтните архитектури на консорциума за индустриален интернет на нещата, архитектурите OPC UA, както и тези съгласно стандарта IEC 62264 са фокусирани върху мониторинг в реално време, прогнозни анализи и оптимизиране на използването на енергия и позволяват вземането на решения в реално време, предсказваща поддръжка и интеграция с други инициативи за интелигентна фабрика. Те са подходящи за индустрии със значително висока степен на автоматизация и дигитализация.

Унифицираните информационни модели (UIM) в системите за енергиен мениджмънт (EnMS) са от решаващо значение за осигуряване на безпроблемна интеграция, обмен на данни и оперативна ефективност. Те стандартизират представянето на данни и взаимодействия, свързвайки различни системи, технологии и заинтересовани страни. Унифицираните информационни модели (UIM) улесняват безпроблемната комуникация между различни системи чрез предоставяне на обща структура на данните и семантика. Те се приспособяват лесно към нови технологии и системи, осигурявайки мащабируемост, тъй като енергийните системи се усложняват. Осигуряват единен достоверен източник, свеждайки до минимум несъответствията в данните и подобрявайки вземането на решения, и са съобразени с индустриалните стандарти. Намаляват разходите за разработка, поддръжка и експлоатация чрез стандартизиране на системните интеграции.

Референтните рамки и архитектури могат да се възприемат като слоеве на една интегрирана система от знания: рамките определят контекста и методите, архитектурите описват структурната организация, моделите дефинират функциите, а унифицираните информационни модели осигуряват единен и разбираем език за обмен на данни.

Заклучение

Развитието на интелигентните системи за енергиен мениджмънт предполага тясна интеграция между концептуални, референтни и информационни модели, изградени в съответствие с международно признати стандарти. Прилагането на архитектурни рамки като RAMI 4.0, SGAM, както и на комуникационни и информационни стандарти като OPC UA и IEC 62264, осигурява стабилна основа за дигитализацията и автоматизацията на енергийните процеси.

Посоката на развитие е към самообучаващи се и адаптивни енергийни системи, които, използвайки методи на изкуствения интелект и семантичните технологии, ще могат да оптимизират потреблението на енергия в реално време, да реализират предсказваща поддръжка и да повишават устойчивостта на индустриалните предприятия.

По този начин референтните рамки и модели се превръщат от инструмент за стандартизация в интелигентна методологична основа, която подпомага прехода към Индустрия 5.0 – нова епоха на хуманно-центрирана, енергийно ефективна и взаимосвързана индустрия.

Литература

1. Karagiannis, D., H. Kühn. *Metamodeling Platforms*. LNCS 2455. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2002, 182.
2. ISO/IEC/IEEE-42010:2011. *Systems and Software Engineering – Architecture Description*.
3. Mili, H., M. Fayad, D. Brugal, D. Hamu, D. Dori. *Enterprise Frameworks: Issues and Research Directions*. – *Software: Practice and Experience*, 32, 2002, 801–831.
4. ISO 50001:2011. *Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use (IDT)*.
5. Uslar, M., S. Rohjans, C. Neureiter, F. P. Andrén, J. Velasquez, C. Steinbrink, V. Efthymiou, G. Migliavacca, S. Horsmanheimo, H. Brunner, T. I. Strasser. *Applying the Smart Grid Architecture Model for Designing and Validating System-of-Systems in the Power and Energy Domain: A European Perspective*. – *Energies*, 12, 2019, 258. doi: 10.3390/en12020258.
6. Industry IoT Consortium. *The Industrial Internet Reference Architecture, Version 1.10*. An Industry IoT Consortium Foundational Document, 2022-11-07.
7. OPC UA Foundation. *OPC UA Specification, Part 1: Overview and Concepts*. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.
8. VDI/VDE/ZVEI. *GMA Status Report: Reference Architectural Model Industry 4.0 (RAMI4.0)*. 2015. https://www.vdi.de/.../VDIGMA_Statusreport_Referenzarchitektur.
9. ISO/IEC 62264-3:2007. *Enterprise-Control System Integration, Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management*. CEN/CENELEC Management Centre, Brussels.

За контакти:

Д-р инж. Полина Кесова

p.krasimirova@gmail.com

Проф. д-р Идиллия Бачкова

idilia@uctm.ed

Катедра „Автоматизация на производството“

Химикотехнологичен и металургичен

университет – София

90-годишен юбилей на акад. Васил Сгурев



На 3 май 2026 г. акад. Васил Стоянов Сгурев навърши достойните 90 години! Изявен български инженер, утвърден учен с международна известност и значим принос в областите на кибернетиката, роботиката, информатиката и интелигентните системи, той е сред водещите представители на българската научна

школа в областта на сложните системи и управлението.

Акад. Сгурев е свързан дългогодишно със Съюза по автоматика и информатика „Джон Атанасов“ (САИ). Негов председател е от 2005 до 2017 г., а оттогава е заместник-председател. Участва активно в многостранните дейности на САИ и в процесите на вземане на решения за неговото развитие и утвърждаване.

Роден е на 3 май 1936 г. в гр. Първомай. През 1960 г. завършва висше инженерно образование в Ленинград (днес Санкт Петербург), където през 1968 г. защитава дисертация за кандидат на техническите науки (днес доктор). Специализира в Института по кибернетика към Академията на науките на Украинската ССР в Киев и в Института по информатика към Руската академия на науките в Ленинград (днес Санкт Петербург).

Васил Сгурев преминава успешно през всички научни степени и академични длъжности – от научен сътрудник в Института по техническа кибернетика (ИТК) при БАН до академик на БАН. От 1974 г. е старши научен сътрудник II ст. (днес доцент) в ИТК при БАН, а от 1983 г. – старши научен сътрудник I ст. (днес професор) в същия институт. През 1983 г. придобива научната степен доктор на техническите науки в БАН.

През 1989 г. е избран за член-кореспондент на БАН, а през 1997 г. – за академик на БАН.

Акад. Сгурев е автор на 14 монографии и научни книги в България и в чужбина и едно учебно ръководство. Има общо 419 научни публикации у нас и в чужбина.

Научната му кариера е свързана с развитието на българската школа по автоматизация, управляващи системи и информатика. В началото на професионалния си път работи по проектиране и експлоатация на автоматизирани системи, а впоследствие научните му интереси се насочват и развиват към информационните технологии, роботиката и интелигентните системи.

Член на научните съвети на академични звена и институти в БАН: ИТК, Института по техническа кибер-

нетика и роботика (ИТКР), Института по мехатроника, Института по компютърни системи, Института по информатика, Централната лаборатория по паралелни процеси, Института по информационни технологии, Института по информационни и комуникационни технологии (ИИКТ), както и на научните съвети на УНИБИТ и по енергокибернетика към Министерството на енергетиката. Председател е на научните съвети на ИТКР-БАН и на Института по информатика при БАН.

Три мандата – общо 10 години, е член на комисията по машинно-електротехническите науки към Президиума на ВАК и един мандат е член на този президиум. Член на научните съвети към Централното управление на БАН – по електронизация, по научно приборостроене, по роботика. Член на комисията по информатика към НФНИ и председател на комисията по електроника към научния фонд по технологиите.

Член на редколегиите на списания: Доклади на БАН; Проблеми на техническата кибернетика и роботика (главен редактор); Техносфера (главен редактор); CIT; Computers and Artificial Intelligence; AI Communications; ITA; Понеделник.

Ръководи секции и/или пленарни доклади на международни научни форуми: от AIMSА' 84 до AIMSА'94; APCSР'87 и APCSР'89; ГАПС'87; COMCONTROL; ПЕРСКОМП'85 и '87; ROBСОН'2; PROLAMAT'82; CAD/CAM: Robots and Factories of Future; ICAMC'84, 89, 2012, 2014, 2016, 2018; ИИ'89; IMS'90; ARS'72; IEEE-IS; CompSysTech.

Почетен председател на поредиците от международни конференции IEEE-IS, ComSysTech и Автоматика и информатика (ICAИ от 2020 г.). Участва в програмните комитети на над 30 международни конференции.

В периода от 1982 г. до 1987 г. ръководи дейността на БАН по Националната програма за персонални компютри (1982-1985 г.), както и програмата за промишлените работи.

Участва в 28 експертни комисии и съвети като представител на научните направления „Информационни технологии“ и „Автоматика“.

Има признати 30 авторски свидетелства и патенти, седем от които са реализирани в чужбина. Името му е вписано в „Златната книга“ на българските изобретатели на Патентното ведомство на България.

Документално доказаните внедрявания са 20, сред които компютърните управляващи машини и системи АСТРА, ТРАСИ и ИКАР-10, пакетите приложни програми LP-16, FP-16, СА-16, MONP-16, СП-16, КСИ-ДИ 87, БИНОП, ДИСПРОГ, както и интелигентните контролери и системи КСИ-10, КСИ-16, КСИ-ОПТИМА и други.

Като и.д. директор на ИТКР (1982-1987 г.) заедно с колектива на института има приноси за бързото развитие и внедряване в България на персоналните компютри и в създаването и развитието на индустрията за серийното им производство. Аналогични са и съответните приноси в разработването в ИТКР промишлени роботи и системи и в тяхното индустриално производство, подготовката на кадри, внедряването.

Участва в 37 национални и 23 международни научноизследователски проекта, на 26 от които е ръководител.

Общият брой на подготвените и защитили докторанти е 16.

От 1974 до 1978 г. е научен секретар на ИТК и ръководител на секция „Интелектуални системи“. От 1978 до 1990 г. е ръководител на направление „Информатика“ в ИТКР и на секция „Кибернетични системи“. От 1982 г. в продължение на четири години е и.д. директор на ИТКР, а от 1978 до 1990 г. – зам.-директор. Директор на Института по информатика при БАН и ръководител на секция „Кибернетични системи“ в него (1990-1992 г.). Ръководител е на секция „Интелигентни системи“ в ИИТ и ИИКТ до 2012 г.

Научен секретар на БАН и член на неговия секретариат (1977–1979 г.). Член на Президиума на БАН (1977–1990 г.). Член на Общото събрание на БАН (1978–1998 г.). Инициатор е за създаването на Отделението за инженерни науки (ОИН) на БАН и негов първи председател. Член на Събранието на академиците и член-кореспондентите (САЧК) на БАН.

Акад. Сгурев е председател на Федерацията на научно-техническите съюзи (ФНТС) в България от 2001 г. до 2012 г. Основният му принос е съхраняването на материалната база на тази най-голяма професионална организация у нас.

Член е на американския Институт на инженерите по електротехника и електроника (IEEE) от 1996 г. и е негов старши член. Зам.-председател е на българската секция на IEEE. Член на Европейския координационен комитет по изкуствен интелект (ECCAI) от 1985 до 1994 г. и на Американската асоциация по изкуствен интелект (AAAI) от 1990 до 2000 г. Член на Международната организация по изследване на мозъка (IBRO) и на работната група по изкуствен интелект TC-12 към IFIP. Председател на българската част на PG-18 на източноевропейските страни по изкуствен интелект. Инициатор и председател е на българската група по изкуствен интелект към ECCAI (1985-1992 г.) и на Българската асоциация по изкуствен интелект (БАИИ) от 1990 г. до 1994 г. Председател на Българското дружество по разпознаване на образи (БДРО) от 1994 г. до 2001 г., на Българското дружество по роботика (БДР) от 2011 г. и на Националния екологичен клуб до 1994 г. Член от 1993 г. на Санкт-петербургската инженерна академия. Членува в Международната асоциация по навигация.

Получава Наградата на БАН и Софийския университет „Св. Климент Охридски“ за технически науки, три

златни медала на Международния панаир в Пловдив, златен медал от ВДНХ и званието „Заслужил изобретател“.

Награден е с орден „Кирил и Методий“ I степен (1985 г.). През 2010 г. е удостоен с най-високото държавно отличие на Република България – орден „Стара планина“ I степен.

През 2025 г. акад. Васил Сгурев е удостоен с почетното звание „Доктор хонорис кауза“ на Русенския университет „Ангел Кънчев“.

БАН отбеляза тържествено 90-годишнината на акад. Васил Сгурев на 14 май 2026 г. Председателят на БАН, чл.-кор. Евелина Славчева, връчи на акад. Сгурев отличителния знак на председателя на БАН за цялостния му принос към развитието и популяризирането на българската наука, по-специално в областта на електрониката, роботиката и информационните технологии.

Наред с постиженията си като изтъкнат инженер и учен, акад. Сгурев се отличава и с разностранни таланти и широк кръг от интереси. Той има значим принос за изследването на първото техническо дружество в България, създадено в Русе на 26 март 1885 г. През 2014 г. излиза първото издание на съвместната книга на акад. Васил Сгурев и чл.-кор. Христо Белоев „Българското техническо дружество в архивните документи“. Съавтор е и на книгите „Положителните науки с приложение към индустрията. История на висшето техническо образование в България“ (2019 г.) и „Научно-техническите съюзи в България. Начало и възход“ (2022 г.), посветена на 130-годишнината от организираното движение на инженерите и архитектите у нас чрез тяхната организация БИАД – пряк исторически предшественик на днешната Федерация на научно-техническите съюзи (ФНТС).

Автор е и на три исторически изследвания, посветени на Втората световна война – „Курският сблъсък“ (2018), „От Курск до Източна Прусия“ (2021) и „Последни сражения“ (2023).

Най-новата книга на акад. Сгурев – „Омая“ (2026), е поетична. Тя съдържа 400 четиристишия, писани в продължение на повече от 50 години и повлияни от прочутите рубаи на Омар Хаям. Още от ранните си години акад. Сгурев е запленен от Омар Хаям и неговия „Рубаят“. През 2023 г. той издава книгата „Размисли“ – задълбочено есе, посветено на приноса на Омар Хаям към точните науки. Втората част на книгата съдържа стихове, посветени на съвременността. Чрез тях ученият представя своя поглед към съвременната реалност, човешките отношения и предизвикателствата на модерния свят.

Ръководството, всички членове на САИ, редколегията и редакцията на сп. „Автоматика и информатика“ поздравяват акад. Васил Сгурев за неговия 90-годишен юбилей и му пожелават здраве, дълголетие, сили и вдъхновение за нови творчески успехи и изяви!

Списание „Автоматика и информатика

Шкафове за употреба на открито от Rittal

Сигурни и защитени във всякакви условия



Rittal е синоним за най-високо качество, издръжливост и надеждност в производството на табла и шкафове. И това е особено вярно в сегмента за употреба на открито. Нашата основна цел е максималната защита на вашето електрическо оборудване и компоненти, колкото и враждебна да е вашата среда. Независимо дали това означава екстремни температури, излагане на UV радиация, агресивни атмосфери, силно натоварване от вятър, прах или влажност: шкафите на Rittal издържат дори на най-тежките условия.

Правилното решение за всяка среда

Изборът е ваш: можете да персонализирате вашия шкаф с набор от стандартни опции, например със специални панели за шкафове, охлаждащи модули, вентилационни решетки, заключващи системи или дори нагреватели. Всичко за защита на конкретното ви приложение – във всяка област.

Можете да разчитате на Rittal, за да ви помогне да планирате и управлявате приложението си спокойно:

- Бързо разгръщане във всяко поле, благодарение на интелигентната комбинация от шкаф и система за климатичен контрол

- Здрави шкафове за абсолютно сигурна работа дори в най-трудните среди
- Радикално намалени енергийни разходи, максимална наличност на системата и още по-дълъг експлоатационен живот

Стандартни решения на Rittal за открито – 6 основни причини да гарантирате, че вашата инсталация и оборудването са обезопасени и защитени във всякаква среда:

1. Незабавна наличност като модулна система – без загуба на време
2. Сигурност и дълъг експлоатационен живот – трайна инвестиционна стойност
3. Широк температурен диапазон – сигурна защита при всякакви климатични условия
4. Устойчивост – намалете въглеродните отпечатъци и щадете околната среда
5. Удобен монтаж и сервиз – бързо пускане в експлоатация, минимален престой
6. Глобална сервизна мрежа



Thera Pro HR90 - Новият стандарт при радиаторните термостати

Електронния радиаторен термостат TheraPro HR90 ще ви накара да се чувствате комфортно по всяко време на деня и нощта. Просто програмирате температурата на идеалното за вас ниво във всяка стая - през цялото време ще се насладите на комфорт. Програмирането е по-лесно, отколкото си мислите! Страхувате ли се да се правят промени в настройките? Не се притеснявайте! Три програми по подразбиране ще го направят за вас. Ние също така се надяваме, че ще бъдете впечатлени от компактния модерен дизайн, ясения видим дисплей, интуитивна работа и потенциалните икономии на разходи до 30%. Всичко това го има само в новия TheraPro HR90!



АВТОМАТИКА и ИНФОРМАТИКА

ISSN 0861-7562 Print, ISSN 2683-1279 Online

URL: <https://sai-bg.com/category/journals/automatica-and-informatics/>

Година LIX

№ 2/2026

СЪДЪРЖАНИЕ

ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

С. Стойкова. Платформа за локално обучение на големи езикови модели 5

АВТОМАТИКА

П. Петков. Приложение на диференциалната топология в инженерните науки. Кратък обзор 12

ЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

М. Хаджийски, Н. Делийски, Н. Тумбаркова, Д. Ангелски, П. Вичев, К. Атанасова. Изчисляване и апроксимиране със софтуера Table Curve 2D на енергията, необходима за размразяване на трупи 19

П. Кесова, И. Бачкова. Обзор на интелигентни референтни рамки, архитектури и модели в системите за енергиен мениджмънт 29

ГОДИШНИНА

90-годишен юбилей на акад. Васил Сгурев 36

Указател на рекламните и рекламно-информационните материали

САТ – 2 корица

ФНТС – 3 корица, стр. 18

СОФСПРАВКА – стр. 28

РИТАЛ – стр. 38

ХАНИУЕЛ – стр. 39

СИМЕНС – 4 корица

Абониране

За сп. „Автоматика и информатика“

Абонирането за сп. „Автоматика и информатика“ може да става чрез:

- Фирми-разпространители.
- САИ – целогодишно:
 - директно в редакцията;
 - чрез дружествата и клубовете на САИ;
 - с превод по банковата сметка на САИ.

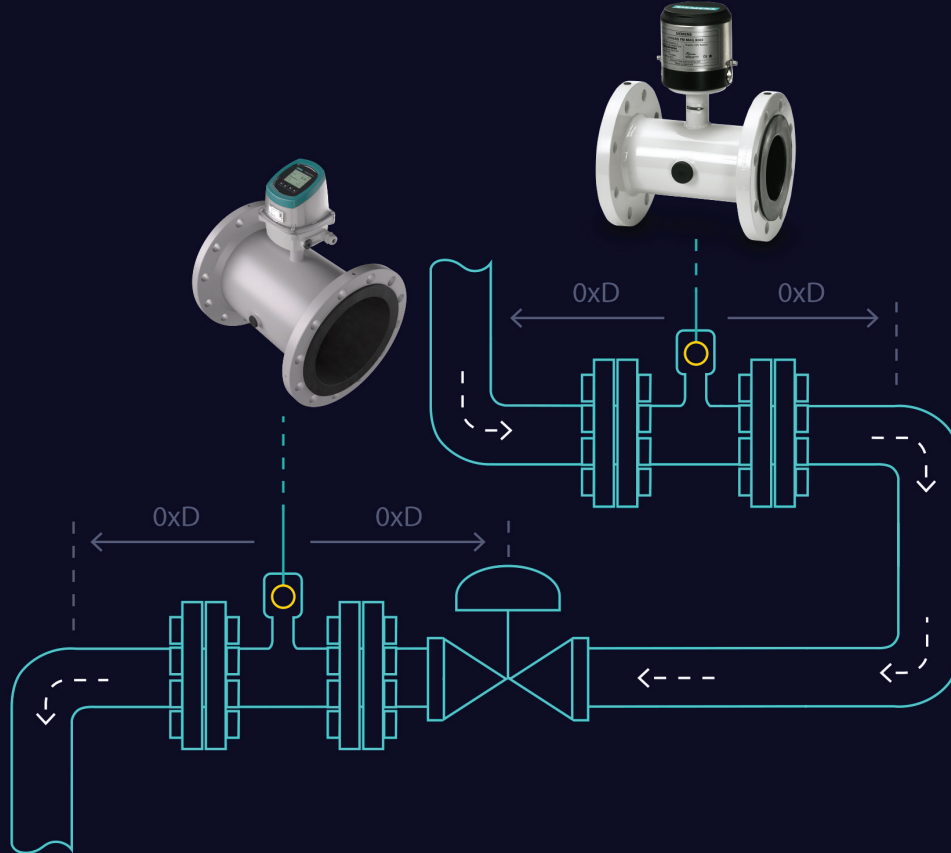
Членовете на САИ ще получават списанието след заплащане на членския си внос и минимална сума за абонамент за списанието.

Банкова сметка:

с/ка: BG81BPBI79421044117201
BIC: BPBIBGSF
Юробанк България АД
клон София – окръг
ул. Раковски 137
1000 София

Адрес на редакцията:

ул. Раковски 108
1000 София
e-mail:
sai.bg.office@gmail.com
www.sai.bg



SITRANS FMS300 и FMT020

Прецизност от ново поколение при измерване на дебита

Защо да изберете SITRANS FMS300 и FMT020:

- Безкомпромисна здравина в Siemens EcoTech дизайн
- Максимална устойчивост при работа с корозивни флуиди
- Безупречна прецизност в критични процеси
- Дигитална свързаност от ново поколение

Научете
повече



Свържете се с нас:
di.bg@siemens.com

SIEMENS