

ISSN 3083-6573 Print
ISSN 3083-6581 Online

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

ITS INFORMATION TECHNOLOGIES & SYSTEMS

1 (7)
2026

TOPICS

- AUTOMATED PLANNING,
DESIGN AND PRODUCTION
MANAGEMENT
- MEDICAL DOCUMENTATION
FILLING BY RECOGNITION
- INFORMATION TECHNOLOGIES
IN SCIENCE AND PRODUCTION

Editor-in-Chief: O.M. KHIMICH, (Kyiv, Ukraine)

Deputies Editor-in-Chief: O.Ye. VOLKOV, (Kyiv, Ukraine),
Ye.A. SAVCHENKO-SYNIKOVA, (Kyiv, Ukraine)

Editorial Board: Ali Abbasov Mammad oglu (Baku, Azerbaijan); O.Yu. Azarkhov (Dnipro, Ukraine); I.Ye. Andrushchak (Lutsk, Ukraine); A.V. Anisimov (Kyiv, Ukraine); I. Vlahavas (Thessaloniki, Greece); W. Wojcik (Lublin, Poland); D.O. Volosheniuk (Kyiv, Ukraine); A.M. Hlibovets (Kyiv, Ukraine), O. Gorbunovs (Riga, Latvia); V.F. Gubarev (Kyiv, Ukraine); L.F. Gulyanytskyi (Kyiv, Ukraine); A.M. Gupal (Kyiv, Ukraine); V.V. Zosimov (Odesa, Ukraine); P.I. Kohut (Dnipro, Ukraine); L.M. Kozak (Kyiv, Ukraine); S.L. Kryvyy (Kyiv, Ukraine); V.I. Lytvynenko (Kherson, Ukraine); R. Martínez Béjar (Murcia, Spain); O.V. Palagin (Kyiv, Ukraine); S.D. Pogorilyy (Kyiv, Ukraine); N. Prokofyeva (Riga, Latvia); B. Savchynskyy (Heidelberg, Germany); A.-B. M. Salem (Cairo, Egypt); K.M. Synytsa (Kyiv, Ukraine); V.S. Stepashko (Kyiv, Ukraine); I.V. Surovtsev (Kyiv, Ukraine); L.S. Fainzilberg (Kyiv, Ukraine); A.O. Chykriy (Kyiv, Ukraine); M.I. Schlesinger (Kyiv, Ukraine)

Responsible Executor: H.O. Pezentsali

Editors: N.A. Charchiyan, A.Yu. Vitchenko, O.O. Lysenko

Computer Group: O.V. Tupalskiy, N.S. Stashkova

Media ID R30-05899

Editorial address: Institute of Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
40, Hlushkova Akd. ave., Kyiv, 03187
phone: +380 (44) 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
<https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its>

Головний редактор: О.М. ХІМІЧ (Київ, Україна)

Заступники головного редактора: О.Є. ВОЛКОВ (Київ, Україна),
Є.А. САВЧЕНКО-СИНЯКОВА (Київ, Україна)

Редакційна колегія: Алі Аббасов Маммед огли (Баку, Азербайджан); О.Ю. Азархов (Дніпро, Україна); І.Є. Андрущак (Луцьк, Україна); А.В. Анісімов (Київ, Україна); І. Влахавас (Салоніки, Греція); В. Войчик (Люблін, Польща); Д.О. Волошенко (Київ, Україна); А.М. Глібовець (Київ, Україна); О. Горбуновс (Рига, Латвія); В.Ф. Губарев (Київ, Україна); Л.Ф. Гуляницький (Київ, Україна); А.М. Гупал (Київ, Україна); В.В. Зосімов (Одеса, Україна); П.І. Когут (Дніпро, Україна); Л.М. Козак (Київ, Україна); С.Л. Кривий (Київ, Україна); В.І. Литвиненко (Херсон, Україна); Р. Мартінес Бежар (Мурсія, Іспанія); О.В. Палагін (Київ, Україна); С.Д. Погорілий (Київ, Україна); Н. Прокоф'єва (Рига, Латвія); Б. Савчинський (Гейдельберг, Німеччина); А.-Б. М. Салем (Каїр, Єгипет); К.М. Синиця (Київ, Україна); В.С. Степашко (Київ, Україна); І.В. Суворцев (Київ, Україна); Л.С. Файнзільберг (Київ, Україна); А.О. Чикрій (Київ, Україна); М.І. Шлезінгер (Київ, Україна)

Відповідальний виконавець: Г.О. Пезенцалі

Редактори: Н.А. Чарчіян, А.Ю. Вітченко, О.О. Лисенко

Комп'ютерна група: О.В. Тупальський, Н.С. Сташкова

Технічне редагування та комп'ютерна верстка: Н.М. Коваленко

Ідентифікатор медіа: R30-05899

Адреса: Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, м. Київ,
Просп. Акад. Глушкова, 40, 03187
Телефон: 526-00-09, e-mail: its.journal.ua@gmail.com,
Сайт: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/its/>

Підп. до друку 30.04.2026 р. Формат 70 × 108/16. Гарн. Book Antiqua.
Ум. друк. арк. 7,18. Обл.-вид. арк. 7,28. Тираж 68 пр. Зам. № 8035

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України
01024, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
 INSTITUTE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS
 V.M. GLUSHKOV INSTITUTE OF CYBERNETICS

**INFORMATION
 TECHNOLOGIES
 SYSTEMS**

**1 (7)
 2026**

ACADEMIC AND RESEARCH JOURNAL
 FOUNDED IN JANUARY 2025
 PUBLISHED 6 TIMES PER YEAR
 KYIV

CONTENTS

Digitalization of Economic Systems

Zelinsky V.A., Zelinskyi A.O. System of Models for Automated Planning, Design and Management of Discrete Production 3

Information and Communication Technologies

Antoniuk Ya.M., Shyiak B.A., Tkalya V.H., Arkhanhelska S.L. Telemetry as the Foundation of Predictable QoS in Hybrid Campus Networks 35

Digital Medicine

Zatulovskyi H.A., Pidnebesna H.A. System for Medical Documentation Filling Based on Automatic Recognition of Audio Recordings 43

Evolution of Scientific Research

Lapa O.P., Pavlenko N.Ye., Tymofijeva N.K., Shevchenko S.A. Information Technologies in Science and Production 54

Author Guidelines 79

ЗМІСТ

Цифровізація економічних систем

Zelinsky V.A., Zelinskyi A.O. System of Models for Automated Planning, Design and Management of Discrete Production 3

Інформаційно-комунікаційні технології

Antoniuk Ya.M., Shyiak B.A., Tkalya V.H., Arkhanhelska S.L. Telemetry as the Foundation of Predictable QoS in Hybrid Campus Networks 35

Цифрова медицина

Zatulovskyi H.A., Pidnebesna H.A. System for Medical Documentation Filling Based on Automatic Recognition of Audio Recordings 43

Еволюція наукових досліджень

Лапа О.П., Павленко Н.Є., Тимофієва Н.К., Шевченко С.А. Інформаційні технології в науці та виробництві 54

Керівництво для авторів 79

DIGITALIZATION OF ECONOMIC SYSTEMS

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.003>
UDC 004.9; 658.5

V.A. ZELINSKY, Leading Engineer,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6464-1702>
zelinsky_v@ukr.net

A.O. ZELINSKYI, Student,
Kyiv National University of Construction and Architecture,
31, Air Force ave., Kyiv, 03037, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-8310-6061>
antoxa.c@gmail.com

SYSTEM OF MODELS FOR AUTOMATED PLANNING, DESIGN AND MANAGEMENT OF DISCRETE PRODUCTION

The functioning of an industrial enterprise of discrete production is considered as a set of interconnected production and design processes and managing them. Computer modeling of processes is used to review options for enterprise activity plans and choose the best one for its implementation. Variants of model structures and corresponding modeling algorithms are obtained as a result of generalization of enterprise processes. The parameters of the models (list of works, standards of consumption time, materials, etc.) are established on the basis of the experience of performing the relevant activity for the industry and are adjusted based on the conditions of the given enterprise and the generalization of its specific experience.

Keywords: model of production processes, aggregation, decomposition, calendar plan, inventory management, system optimization.

Introduction

In addition to production processes, the planning of which takes place using models of the theory of schedules and inventory management, the enterprise management system includes the processes of designing, as well as the processes of analyzing and correcting models, which are used both for planning and for designing.

Cite: Zelinsky V.A., Zelinskyi A.O. System of Models for Automated Planning, Design and Management of Discrete Production. *Information Technologies and Systems*. 1 (7). 2026. 3–34. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.003>

© Publisher PH “Akadempriodyka” of the NAS of Ukraine, 2026. The article is published under an open access license CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Aggregated production models represent processes in a simplified form, which allows planning for long periods of time, taking into account only significant circumstances that can affect current decisions and also divide the planning task into several weakly dependent detailed ones of smaller dimensions. Detailed models are used for close-term planning and may have a specific structure. Constructed detailed plans require coordination among them and can be used as an initial state for the prolongation of aggregated plans.

Aggregated models of constructions and technological processes are used in design tasks with a similar goal — decomposition of a complex project into sub-systems. In addition, the product manufacturing project in an aggregated form allows you to start planning its production even before the detailed project is completed. This shortens the time from the beginning of the project development to the production of the product.

The purpose of the article is to analyze and develop a system of models and algorithms, that can be used to automate planning, design and management processes at all stages and levels of production management. The ultimate goal is to create an integrated computer control system that can function without the use of paper media and with the maximum possible release of the manager, designer, technologist, as well as the equipment operator from routine functions.

1. Automation of Production Management — Current State

Modern systems of automated production management have gone from simple MRP, MRPII, which plan only material resources, to more sophisticated ERP and ERPII, which are focused on quick adaptation of the entire management system to changes in internal and external conditions. Next in this section we consider their accepted classification [1].

1. Material Requirement Planning (MRP) proceeds from the plan for the release of commercial products and the description of technological processes for them.

2. Manufacturing Resource Planning (MRPII) complements MRP by planning the need for equipment, labor, energy, etc. Disadvantages of MRP and MRPII are the difficulty of restructuring plans taking into account new circumstances that emerge during the execution of plans within the enterprise and among its partners.

3. Enterprise Resource Planning (ERP) complements MRPII in terms of prompt adjustment of plans, as well as creation of an infrastructure for electronic data exchange with suppliers and consumers.

4. Customer Synchronized Resource Planning (CSRP) complements ERP with the possibility of participation and influence of the consumer on the quality of goods through complaints, wishes and ordering the necessary, and also provides warranty and post-warranty service.

5. Enterprise Resource and Relationship Processing (ERPII) complements CSRP with expanded opportunities for cooperation with stakeholders: industry project organizations and competitors (mutually beneficial exchange of experience and its generalization); state bodies (labor, tax legislation); public organizations (waste management, ecology, etc.).

Companies that implement these automated systems have ready-made software modules and subsystems that are combined depending on the needs of the enterprise. The process of implementing automated systems begins with the developer's study of the company's processes and coordination of the developer's positions with the company's staff. Selected modules of the future automated system are supplemented, corrected, tested on control examples and filled with data of a specific enterprise.

Next, models and algorithms that can be used to design software modules of future automated systems are considered.

2. Models of the Theory of Schedules and Inventory Management

2.1. The Basic Structure of the Production Process Model. The model is a simplified description of the subject area in the form of a list of specific objects and processes and the values of their parameters (properties and relations). The structure of the model describes only the classes of objects and processes, and also indicates their parameters without specifying values; certain relationships are established between parameter values. Building a model based on a certain structure consists in defining a list of objects/processes defined by the structure and some of their parameters; other parameters remain undefined. The modeling algorithm provides for the determination of unspecified parameters based on the relationships specified by the structure. If these ratios are not sufficient to unambiguously determine the values of the parameters, then it is necessary to set an evaluation criterion for each possible (compatible with the given ratios) option. Further, these concepts will be used to describe the structure of the *production process model* (PPM).

We will start from the concepts used in machine and instrument construction; other types of discrete production are to a large extent similar and simpler. For PPM elements, we will introduce abbreviations and indicate them in italics. The main element of PPM is the model of production of *goods and provision of services* (G&S). As the basic level of the production model of the G&S, we will accept the *design and technological specification* (DTS), which is the result of the design of the G&S and the design of its manufacturing technology. Components of the DTS are *parts and assemblies* (PA) with the relationship "PA_x is included in PA_y". For each PA, the manufacturing method is specified in the form of *technological process* (TP) — sequence of *technological operations* (TO); G&S is the final PA or their set. Each TO consume *non-renewable resources* (NR): materials, blanks, components, etc. and takes the time of the operator and the renewable resources used by him: equipment, tools, equipping, etc., which are not completely consumed during one TO, but may require periodic: repair, adjustment, sharpening, etc. The operator (one or several workers) and the renewable resources assigned to him will be called the *performer* (PF). The maintenance process is determined during the design of the TP in a language that is understandable for an operator with the appropriate qualification. The same TP is used for the production of many copies of PA, and therefore G&S.

PPM, in addition to the production model of the G&S, includes: a *time scale* (TS) with a certain discreteness of measurements, which continues as needed; available PFs, with possible intervals of inoperability; the stock and receipts of NR tied to the TS, which can be used during the production of TO.

Below are the simplifications and clarifications of the concept of TO, adopted by us — the real process may differ slightly.

1. TO lasts a certain continuous time and ends with a certain change in the PA. TOs are related by the “previous-next” relationship, if the result of the previous TO is used as the NR for the next one. NRs are consumed at the beginning of the performing TO and allow accumulation for the next use, which allows you to match the rate of their receipt with the rate of consumption.

2. The PF is usually capable of performing several different TOs over different PAs. Identical processing of several identical PAs in a row at one PF is performed with minimal time spent on reconfiguration — switching to processing other PAs requires more time, which depends on the previous and subsequent TO. Transfer of PAs between PFs generally occurs in batches of several pieces. Increasing the batch size reduces equipment set-up costs as well as transportation costs, but at the same time waiting for readiness of the entire PAs batch to transfer between PFs has a negative effect on the level of *work in progress* (WIP) and the duration of G&S production. Therefore, the size of the PAs batch should be determined on the basis of a compromise between the specified factors.

3. In most cases, the PF is fully loaded by one TO over the PAs batch during its entire execution period. But there are PFs that can simultaneously perform TO over several, possibly different, PAs. Examples are thermal and galvanic treatment, cutting, transportation, etc. Simultaneous processing of a certain set of PAs for the given examples is more efficient than individually. In order to take into account the above features of the PF, the planning algorithm should provide for the accumulation of a sufficient number of TO, before starting on this PF with the same performance parameters.

PPM can be adapted to describe a wide class of production processes, particularly when: the position of not only the equipment, but also the PA (houses, airplanes on the runways, etc.) can be fixed — the operator and the processing tool (PF) move between the elements of the processing object (PA); one operator serves several units of equipment — considered as several PFs, etc.

Practically all types of enterprises have, in addition to the main units, engaged in direct production of G&Ss, auxiliary units (create conditions for others) similar to those that are the main ones in mechanical engineering: equipment repair; production of specific equipment, etc. Similar models are used for their planning, but since their processes are weakly dependent and somewhat specific, the planning of the processes of auxiliary units takes place separately with subsequent coordination between themselves and with the plans of the main units.

2.2. Basic Algorithm of Calendar Production Planning. Further, in the text of this and the following paragraphs, the algorithms are described schematically — their transformation into programs requires additions and specification.

The development of technologies takes place in the direction of both the complication of the TOs themselves and the unification of several TOs within the

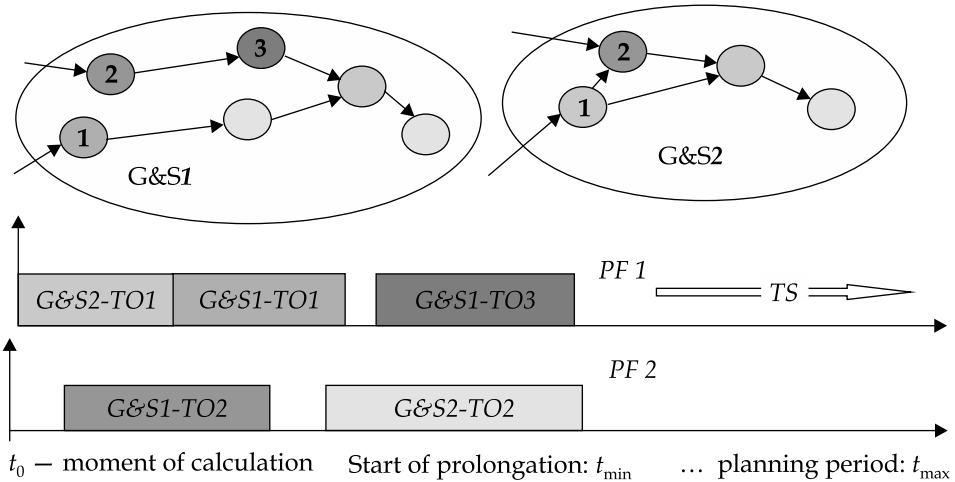


Fig. 1. Simplified PPM-B

framework of comprehensive one. The management of the *TO* execution process is increasingly automated — the operator is removed from the influence on the object of processing and is engaged in the analysis and influence on increasingly general parameters of the *TO* execution. But the principle of structuring production at the enterprise on G&S, which are performed according to the pre-designed *DTS*, consisting of a set of interconnected *TOs*, remains unchanged. Therefore, our further considerations, based on the indicated production process presented, will not lose their relevance. Described in item 2.1 PPM will be accepted as the basic (PPM-B); it will be used:

- to explain the basic principles of production planning — in this section;
- for building aggregated PPMs — in section 3.

The simplified PPM-B is shown in Figure 1. The figure does not show *PAs*, which are usually present in the information base of the *DTS* description; as a result, the structure of the model became simpler without losing essential features.

In Figure 1, from above: G&S production model in the form of a *DTS*-graph: graph vertices — *TO*; arcs — the relationship between *TO*: the result of the previous one (which is at the beginning of the arc) is used as a subject of processing for the next one (which is at the end of the arc); arcs from the outside of the *DTS* graph indicate that the *TO* requires other *NRs* in addition to the results of previous *TOs*). From below: distribution of *TO* on *TS* and on *PF*.

In addition to those depicted in Fig. 1, PPM-B also contains other parameters:

- for *PF*, periods of forced downtime associated with equipment repairs and operator absence are indicated on *TS*;
- for *TO* specify the parameters;
 - for “previous-next” relations between *TOs*, indicate the number of results of the previous *TO*, which is used for the next one;
 - *PFs* that can perform it and the duration of set-up, depending on the previous *TO*;
 - specific equipping and *NR*;

— norm of time for execution, etc.

Thus, PPM-B describes the possible options for the production of G&S — it leaves the executors and terms of execution of the TOs undefined. The application of the structure described above for modeling the production process is also known as models of *calendar planning* (CP) [2—5]. Next, we will present one of the variants of the CP algorithm, which simulates the variants of the production process and looks for the best among them according to the given criterion.

Planning is carried out periodically, with a period τ ; we extend (prolongate) the plan as the previously planned TOs are fulfilled so that the period of existence of the current plan exceeds the minimum permissible value of t_{\min} . The time until which the plan is extended — t_{\max} is distant from t_{\min} by the period — τ , for which calculations are made ($t_{\max} = t_{\min} + \tau$). In case of violation of the current plan, it may be necessary to make an extraordinary adjustment, which can be carried out:

— by using the A1 prolongation algorithm by restructuring the previously prepared plan from the moment the violation was detected;

— by a special algorithm, similar to the usual prolongation, but with a possible partial exemption of the PF from planned TO, when they turn out to be less priority.

Algorithm A1 (prolongation of CP):

1. Enter data for calculations for an additional period up to the moment t_{\max} :
 — readiness times and DTS parameters of those G&S that are specified by the higher-level plan up to the moment t_{\max} . There should be no closed paths in the DTS graph; this is performed during the design and is necessary for the correct operation of this algorithm — none of the TOs located on a closed path will be able to get to the “front” of those for which the previous ones have already been planned;

— for PF, the time intervals of their possible use are determined;

— restrictions on the terms of possible use are determined for the specific equipping;

— for NR, supply plans are determined in accordance with concluded contracts. Some NR and equipping are always available (supplied upon request to the Store) and are not taken into account when planning (item 2.4).

2. Based on the results of preliminary planning, the following data are prepared:

— scheduled TOs over PA batches. In the absence of pre-planning data, the deadlines for the completion of currently executed TOs, which are received from their executors, will be sufficient;

— unplanned TOs of all G&Ss that are present in the planned task and all previous ones for which are already planned or executed — “front” of unplanned TOs that are ready to be inserted into the plan;

— terms of release of PFs from execution of previously planned TOs. In the absence of preliminary planning data, the PFs release term is obtained from its operator.

3. A PF with a minimum release term and the possibility of loading a new TO (taking into account the possible incapacity of the PF) is selected. A TO is selected from the “front”, which is a priority for execution on the selected PF, and we put it in the plan: its start and end terms are determined.

4. The “front” is supplemented by those TOs that follow the TO inserted in the previous step 3 in the plan, and for which there are no other previous TOs not placed in the plan.

5. Plan construction completion check: are TOs present in the “front”?

— if so, then proceed to step 3;

— if the TO “front” is empty, then the work on prolongation the plan is completed for TOs from the G&Ss, the deadlines of which are within t_{\max} , executors and execution terms are defined.

End of A1

The following are comments and additions to the A1 algorithm:

1. Preparation of *PF* work schedules is a preliminary step for CP. Changes in the composition of the *PF* (acquisition/decommissioning of equipment and recruitment/dismissal of personnel) are planned in advance at higher levels of management. At the CP level, this possibility is minimal; only equipment repairs and staff absences (vacation, training, etc.) are taken into account. Of course, the operator is attached to certain equipment and together they form a *PF*. If a situation arises when it is impossible to comply with this (one of the *PF* components is missing), then the operator's ability to work on different equipment and the availability of backup equipment are used. The formation of *PF* work schedules is not a complex task — the unit planner using equipment repair plans, in dialog mode with the computer, will allocate workers to *PF*, agreeing on situations that go beyond the usual order of distribution. Such an agreement requires interaction directly with the employee who is offered a deviation from the usual work order for a certain reward.

2. When determining the start time of the *TO*, selected in step 3, one should take into account not only the completion time of all previous *TO*s, but also the following:

- availability at this moment of all other *NR*s that are consumed by *TO* — those that will be used are removed from the available *NR*s;
- it is necessary to ensure the availability of *PF* during the *TO* execution period, as well as take into account the time for its adjustment;
- the execution of some *TO*s may require equipping, the deadline for which must be agreed with the relevant subsidiary unit.

3. Obviously, according to algorithm A1, it is possible to build any admissible variant of the plan — each new variant can be generated by at least one decision in step 3, which will differ from what was adopted for other variants. The task of finding the optimal relative to the given criterion of the CP option for the general case (without features that could be used to reduce the selection of options) has exponential complexity depending on the dimensionality of the input data — the number of *TO*s that need to be planned and the number of *PF*s. For the conditions of real production, when the dimensionality of CP tasks is measured in thousands, the construction of an optimal plan becomes unattainable even for modern computing capacities. To solve the problems of large-scale CP, the theory of schedules offers heuristic methods that do not ensure the optimality of the plan, but only bring it closer [5] — algorithm A1 is a scheme for the application of such methods. Algorithm A1 makes it possible to sort out compact variants of CP, when each *TO* is inserted into the plan compactly — without obvious loss of time, but also does not prohibit providing unused time intervals of *PF* work in the plan, which can be used as a reserve when adjusting the plan due to deviations. The quality of the variant built by the A1 algorithm depends on step 3, namely, on the selection of the *TO* from the “front”, which is supposed to be carried out according to a certain algorithm. In particular, for the implementation of step 3, a limited (by the number of steps) “branches and bounds” scheme can be applied.

In addition to the specified heuristic search, the simplification of CP tasks can be achieved in several other ways:

— allocation of *PA* from *DTS*, the task and plan for the manufacture of which can be determined separately, based on the inventory management model (item 2.4) and thus reduce the dimensions of *DTS*;

— organization of flow production lines with sequentially placed *PFs*, which can be loaded by a sequence of *TO* (*Flexible Production Lines* — *FPL*). The list of planning objects is shortened in the CP model with *FPL*, and the planning model itself is slightly modified (item 2.5);

— aggregation and generalization (described in section 3), which allow you to break down the general task of CP into sub-tasks of a smaller dimension, followed by their coordination. Further, in item 2.3 describes the corresponding coordination scheme.

2.3. Coordination Scheme of Cooperating Units. Decomposition of a complex process into several weakly dependent ones allows reducing the dimensionality of CP tasks. The higher level of the plan, built using the aggregated model (section 3), defines a rough plan of interaction between units, which in general can be improved due to the coordination of their detailed plans. Next, a scheme of such coordination is proposed.

A rough interaction plan is used as a planning task for detailed planning of each unit. To be able to “shake” the rough plans of interaction, each of the units can use an algorithm similar to A1, but using the principle of system optimization [6]. We turn each of the restrictions in the CP model for detailed planning of the unit, established by the rough plan, into a criterion: we allow its violation and set fines, proportional to the deviation with a coefficient that can be adjusted, based on estimates of real losses in the neighbor. The general quality criterion of each detailed plan is calculated as the sum of fines for violation of each of the restrictions. The option with the minimum total fine is considered the best. The following are possible as external criteria (formed from restrictions on interaction with neighbors):

— exceeding the *G&S* execution terms set by the rough plan. For units as a *G&S*, we accept the results of their activities, which are used by other units or transferred outside the enterprise;

— exceeding the need for specific materials and components, the delivery plans of which are determined by the rough plan. There is no need to plan and coordinate widely used materials and components supplied through the Store — they are planned according to the stock level (see item 2.4);

— violation of equipment repair schedules, established in accordance with planned and preventive repairs, which are the basis for subsequent agreements between the repair unit and the unit using the equipment. Emergency repair of equipment is coordinated with the involvement of the Dispatcher, who determines the degree of responsibility of the equipment user and the repairer to determine fines;

— use of equipping in violation of agreed terms.

In addition to the specified external criteria, in the CP model we will allow internal efficiency losses:

— overtime work of *PF* (in non-working shifts) and its downtime while waiting for work;

- inconsistencies in operator qualifications and *TO* complexity;
- loss of time for setting up the equipment, which depends on the order of starting the *TO*.

Fines for the specified losses of efficiency are usually accepted as certain norms for the entire enterprise and do not require frequent adjustments. The specified violations operate only within certain limits, according to which they are considered inadmissible.

The task of the unit, defined by the rough plan and the payment for its execution, is agreed by the higher-level planner with each unit: the parties agree that the plan is feasible and the executor deserves payment depending on the intensity, which is measured by reserves of time and resources. The unit planner can calculate a detailed plan with external restrictions (maximum fines for violating external criteria), determine internal losses and thus clarify the possibility of meeting the conditions of the rough plan and payment for its implementation.

After coordination with the higher-level planner, the planner of each unit has the opportunity to increase the income of his unit by reducing internal losses and providing better conditions for adjacent units. For this, he evaluates the capabilities of his partner and calculates his plan with the possibilities of violating external criteria, expecting to reduce his internal costs. The result of such a calculation is the appearance in the detailed plan of one's unit of other conditions for the neighbor, compared to the rough or previously agreed plan of interaction. Under stricter conditions for the spouse, our planner offers compensation that he pays from his fund (but not more than the savings of his fund due to the reduction of internal costs). Tougher conditions will be accepted by the spouse if they increase his internal losses no more than the proposed compensation. That is, agreement will occur if each partner benefits.

For mitigating conditions, which may also arise as a result of detailed planning — our planner can receive compensation if these mitigating conditions contribute to the reduction of the spouse's losses.

The process of reconciliation and recalculation can be repeated – each iteration leads to a decrease in total costs for a pair of interacting units, which means that it improves the plan and the “trajectory of movement” of the entire production.

In reality, a situation may arise when the unit cannot fulfill the position of the rough plan. The spouse, knowing this, may demand compensation that is excessive compared to his own losses. In order to prevent unfair benefits for one unit and losses for another, it is necessary to provide a way to resolve this kind of disputes. A higher-level Dispatcher interested in the overall efficiency of interacting units and able to understand their processes can be a judge in their disputes.

It is quite plausible to claim that the iterative process of coordination brings the overall plan of the interacting units closer to a degree of efficiency that could be achieved by solving the CP problem for all units together using the algorithm used for detailed planning.

New conditions for algorithm A1 lead to its complication: it is necessary to choose the values of constraint violations. At the same time, the need for frequent recalculation of plans based on the results of negotiations with partners requires

its quick implementation. The methods of simplifying CP tasks, mentioned at the end of the previous item 2.2 become more relevant.

2.4. Inventory Management Models. According to the inventory management model [7, 8], it is expedient to plan such *PAs* that: will be used for a long period of time; their reserves do not increase the WIP too much, and the stock can be quickly replenished — we will call them blanks. The blanks are concentrated in the Store and can be quickly delivered to the consumer. Reserve quantities of blanks are maintained by ordering them from an external supplier or an internal manufacturer at the moment when their level drops to a certain value.

According to the inventory management model, the following are planned:

- supply of external resources of materials, components, etc., which are available on the market;
- specific *PAs* of own production, which are widely used for a long period of time, have a short production period, which means that they can be noticed in the *DTS* as those that are not planned by the general scheme;
- tool, which is partially repaired at the enterprise and requires replenishment after final wear;
- equipping manufactured at the enterprise, which is stored in the Store for reuse.

The production and repair of these resources at the enterprise are usually carried out by auxiliary units that plan their work based on orders received from the Store. The capacities of these supporting units are maintained based on their loading forecasts. The intensity of their planned tasks is evaluated and compensated by the higher-level Dispatcher, who takes part in determining the required capacity.

The Store, in turn, receives orders from units — consumers of the specified resources; the regulation establishes the deadline for order fulfillment. The consuming unit may not take into account the resource restrictions that are supplied from the Store when planning — it is enough to order the necessary in advance. A delay in the execution of an order is considered as a deviation from the normal course of production and is compensated to the customer by a fine imposed on the Store.

2.5. Flexible Production Line (FPL) & Flexible Production System (FPS). When the need for certain *PAs*, close in technology, increases to the level that will allow to fully load several sequentially placed *PFs*, then it is worth thinking about the organization of a FPL — serially placed equipment with a fixed order of processing a certain set of *PAs* and a close time to complete each *TO* for a given type of *PA*. The advantages are a reduction in the time required for the processing of *PAs* and in transportation costs. In addition, the dimensionality of the CP problem is reduced: several *TOs* over the *PA* batches are considered as one and several *PFs* are considered as one (Fig. 2).

It is possible to process several batches of different *PAs* by one FPL at the same time: batch *PA2* is started before the processing of the previous batch *PA1* is completed.

Before launching a batch of *PAs* of a certain type, the FPL is configured to process *PAs* according to their own technology. If the rate of processing of the next

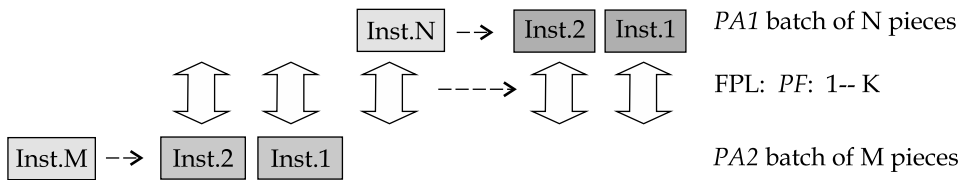


Fig. 2. Loading FPL by batches of PA

batch of PAs is faster than the rate of the previous one, then planning should allow for a delay before starting the next batch. The delay is calculated so that on the last PF, the processing of the last instance of the previous batch is completed before the start of the processing of the first instance of the next batch. Thus, the PA batch planning model changes slightly (in terms of determining the start of the next PA batch), but the sequence of steps of the A1 algorithm, in the case of its application to productions where FPL is used, remains. If the nomenclature of those PAs that fully load a certain FPL is within 3–5, then its planning can be carried out separately, similar to the planning of a separate unit. At the same time, simple calculations are performed to determine the order of launching several batches of PAs, with subsequent coordination with the plans for supplying blanks to the FPL and using its results.

The design of FPL is the selection of PAs with a similar TP and redistribution/modification of TOs between PFs so as to ensure the same sequence and duration of their execution. It is convenient to carry out the relevant calculations and search for the necessary PAs in dialogue with the computer [9].

FPL in many respects is similar to flow (continuous) production, which can be an element of discrete production: certain resources are supplied to the flow input in portions (discretely) and are also discharged in portions. The task of planning discrete production, which contains such “interspersions” of flow lines, is similar to planning with interspersions of FPL. The design of flow production is specific to each subject area and is not considered by us.

During the 4th industrial revolution, which began in 2011, they seek to automate as many operator functions as possible, including setting up equipment for maintenance, control over the processing process, transferring parts between PF-machines, etc. Due to the automation of only FPL, it is impossible to achieve the required flexibility of the production process — various routes of passing PAs between PFs are required, which means synchronization of operation of PFs and transportation of both PA and the tool for debugging PF is required. Appropriate approaches to the management of PFs-machines are developed within the framework of the theory of Flexible Manufacturing Systems (FMS). The corresponding models of calendar planning practically do not change in structure, but stricter requirements are imposed on the accuracy and speed of planning: we have more accurate, complete and operational information from equipment sensors and we need a quick and high-quality reaction to changes in the state of production — expensive equipment should not be idle and needlessly reconfigured. On the other hand, a significant reduction in the number of operators and service personnel allows to organize round-the-clock work of the enterprise

without days off. This imposes additional requirements on the planning task — production processes do not stop, which means that a quick reaction to changes in the production state is required. Several levels of planning with the possibility of coordinating plans between units-automat and between planning levels, discussed in the following section 3, can be applied not only to conventional enterprises, but also to automatic ones. Approaches to planning in FMS with the use of machine intelligence are developing in the areas of Cyber Physical Production Systems (CPPS), Internet of Things (IoT), Digital Twin (DT), Artificial Intelligence (AI), Advanced Robotics [3, 9, 10], which are aimed at providing properties to automata to communicate and make intelligent decisions in real time.

3. Aggregation and Decomposition of Calendar Planning Models

Aggregation and decomposition is the most versatile and powerful approach for reducing the dimensionality of CP problems. Aggregated models are used for long-term planning with subsequent detailing (decomposition) of aggregated plans for nearer periods. Detailed plans are not needed for the long term: for relatively long periods of time, sufficient information is available on the aggregated resource requirements for the production of G&S, the quantity and quality of which may be somewhat uncertain.

Aggregation of PPM-B consists in combining its components (item 2.1) into an interconnected system of their aggregates:

- **aggregated TO (ATO)** — a certain set of TOs belonging to the same G&S;
- **aggregated TP (ATP)** — TP of production of a G&S, which consists of ATO, which do not intersect and together make up a DTS of this G&S;

- **unit of enterprises (UE)** — the set of PFs that are at the disposal of the unit's staff (the PF cannot be part of different UEs). It is accepted that only one UE can be the executor of the ATO: the ATO cannot be partially executed by different UEs and, unlike the TO, has no option for execution by different UEs. This simplifies the structure of the PPM and at the same time does not impose significant restrictions on the determination of the performer of the TOs that are part of the ATO — all PFs that can perform them we will try to concentrate in the corresponding UE. The integration of PF in the UE are designed in dialogue mode, based on the following criteria: *a*) similarities in the professions of PF operators (it is convenient to transfer experience and quickly find a replacement for the operator); *b*) similarities of equipment concentrated nearby (easy to maintain and replace); *c*) possibilities of sequential processing of PA in one UE (to reduce transfers of processing items between UEs); *d*) if TO can be performed using several different PFs, it is desirable to concentrate all of them in one UE;

- **aggregated TS (ATS)** — built by consolidating time measurement units, which is used in PPM-B;

- **aggregates of PF (APF)** — each UE has its own list and composition of APF groups that do not overlap with each other and, to a certain extent, interchangeable. For APF, the time fund tied to ATS is determined based on the expectations of: acquisition, write-off and repair of equipment; admission, dismissal and

absence of employees. For each *ATO*, the *APF* consumption rate is determined as a result of the aggregation of the corresponding *PF* types that use the *TOs* included in the *ATO*.

— *aggregates NR (ANR)* — do not overlap and to some extent are interchangeable so that it is possible to specify them with the necessary *NRs* during detailed planning for the near future. Stocks and receipts of *ANR* are linked to *ATS*. For each *ATO*, the rate of *ANR* consumption is determined as a result of the aggregation of the corresponding types of *NRs* that use the *TOs* included in the *ATO*;

— *aggregated G&S (AG&S)* — group of *G&S*, which we plan with the help of the same *ATP*. As a result of the generalizations, different *G&S* (even those whose detailed technology is still unknown) can be planned with the help of the same *ATP* — their correct specification will be carried out at the stage of decomposition of the plan built on their basis. The adjustment of *ATO* parameters, depending on the time of their execution (and therefore the version of the *DTS* used) is carried out expertly by *G&S* designers.

The list and composition of *UEs* and their *APFs*, *ANRs* and *ATSs* for each aggregation level are fairly stable. For their initial creation and subsequent correction, the planner of the corresponding level receives information about similar *PFs* / *NRs* and in the dialogue mode makes appropriate decisions.

The following decisions about the PPM structure determine the logical complexity of algorithms for solving planning problems. Models with a simpler structure and a greater degree of aggregation can be used for planning for more distant periods and for larger *UEs*. Their purpose: to coordinate rough long-term plans with related enterprises; weed out unpromising variants of detailed plans; divide the task of detailed planning into weakly dependent subtasks.

Next, we will consider variants of PPM structures, which differ in established restrictions on the mutual position of *ATOs* belonging to the same *ATP* in time; other PPM components: *UE/APF*, *ANR*, *ATS* have a similar structure and can only have a different degree of aggregation, which corresponds to the aggregation of resources used by the *ATO*):

— PPM for volume-calendar planning (PPM-VC) uses *ATP-VC*;

— PPM for volume planning (PPM-V) uses *ATP-V*.

To simplify the designations, we will omit the “-VC” suffix for PPM-VC components (for example, *AG&S* instead of *AG&S-VC*); all PPM components for volume planning will be marked with the addition “-V” suffix (e.g. *AG&S-V*).

3.1. Aggregated Technological Process for Volume-Calendar Planning. The structure of the *ATP* model is similar to the simplified *DTS* model (item 2.2): for *AG&S*, we create a separate *ATP* consisting of *ATOs*, which are connected by the relationship “previous-next” (we will mark it with an oriented arc in the *ATO* graph) so that the previous one must be fully executed (all its *TO* components are completed) before the execution of the next one begins (starts at least one *TO* from the composition of the next one). At the same time, we do not impose other restrictions on the mutual position of *ATO* in time — we will determine the terms of execution of *ATO* when building a *volume-calendar plan* (*VCP*) using an algorithm similar to A1. For an *ATO*, the *UE* that performs it and the corresponding *APF* and *ANR* vectors, which are used by the *ATO* during its

execution, are defined. The *ATO* execution time cannot be less than the set minimum, but can be more. With the structure of the *ATP* model, it is possible to set various restrictions on the use of *APF* and *ANR* during the *ATO* execution period, for example:

- certain components of the *ANR* must be submitted in a certain minimum time before the end of the *ATO*;
- for certain components of the *APF*, a limit is set on the amount of the time fund consumed by them, depending on the time until the end of the *ATO*.

The *ATP* construction algorithm aggregates *TOs* running in the same *UE* and with a close advance in relation to the readiness of *AG&S*. The presence of such *TOs* in one *ATO* contributes to their execution without undue delay, which means the reduction of *WIP*. The relationship “previous-next” for a pair of *ATOs* is determined by their composition — the presence of *TOs* in the composition of different *ATOs*, which are in this relationship in the *DTS* model. When building an *ATP*, it is necessary to ensure that there are no closed paths between *ATOs*, laid on the “previous-next” routed connections — such *ATOs* block each other when determining the possibility of launching them for execution. We calculate the need for resources for *ATO* as the sum of the needs of *TO* components and aggregate (roughen) both by time (using *ATS*) and by *APF* and *ANR* groups. The parameters of the duration of *ATO* and restrictions on the periods of consumption of *APF* and *ANR* are determined based on the composition of *ATO*.

When describing the algorithm, we will use the notation:

- $P(X)$ — parameter P of object X ;
- $M\{X\}$, or $\{X\}$: set M of objects X , or set of objects X .

Algorithm A2 (building *ATP*):

1. Preparation of input data and supporting structures:
 - $\{UE \rightarrow \{APF \rightarrow \{PF\}\}\}$ — the list of *UEs*, its composition of *APF* and the composition of each component of the *APF* vector;
 - $\{ANR \rightarrow \{NR\}\}$ — the list of *ANRs* and the composition of each component of the *ANR* vector;
 - *DTS* of the *AG&S* for which the *ATP* is intended to be built. *AG&S* may indicate a *PAS* kit. Parameters must be defined for each *TO*, included in the *DTS*:
 - $UE(TO)$ — the unit performing the *TO*;
 - $PF(TO)$ — $PF \in UE(TO)$, which usually performs *TO* of this type;
 - $D(TO)$ — duration of *TO* execution (on average);
 - $NR(TO)$ — non-renewable resources used in the execution of *TO*;
 - $R(TO \rightarrow \{TO\})$ — links to subsequent *TOs* for this *TO*; in the general case, there may be several of them with different occurrences;
 - In the process of calculations will be determined:
 - $A(TO)$ — minimum advance of readiness in relation to *G&S* readiness, taking into account the execution of the following *TOs* as part of already formed *ATOs*;
 - $L(TO \rightarrow \{ATO\})$ — references to *ATOs* that include *TOs* following this one; in the general case, there may be several of them with different occurrences;
 - $F\{TO\}$ — “front” *TOs*, which are previous to incomplete $ATO \in N\{ATO\}$ (see below);
 - $K\{TO\}$ — the set of *TOs* selected from the $F\{TO\}$ that are prior to the *ATO* selected from the set of incomplete and included to the set of completed *ATOs* in step 5;
 - Parameters are defined for each *ATO* that will be created:
 - $Id(ATO)$ — identifier *ATO*;
 - $UE(ATO)$ — executive *UE* of the *ATO*;

- $A(ATO)$ — advance of ATO readiness in relation to G&S readiness;
- $D(ATO)$ — the minimum duration of ATO , defined as the maximum duration of sequentially executed TO s (chains) in the composition ATO ;
- $St(ATO) = A(ATO) + D(ATO)$;
- $R(ATO \rightarrow \{ATO\})$ — links to the following ATO s (arcs in the ATO graph);
- sets of ATO , initially empty:
 - $N\{ATO\}$ — incomplete ATO s, their composition is expected to be supplemented and parameters to be determined;
 - $Z\{ATO\}$ — filled ATO with defined composition and parameters.

2. Creating an initial $K\{TO\}$:

The final TO of PA , representing the selected AG&S (multiple TO if AG&S is a PA s set) is included to $K\{TO\}$. The value of parameter A (for all TO belonging to the set $K\{TO\}$) set to zero: $A(TO; TO \in K\{TO\}) = 0$. We leave the list of subsequent ATO s for each $TO \in K\{TO\}$ empty: $L(TO \rightarrow \{ATO\}; TO \in K\{TO\}) = \emptyset$.

3. Replenishment of $N\{ATO\}$:

For each $TO^* \in K\{TO\}$ we find ATO^* from the $N\{ATO\}$, to which it can be attached by signs: is performed in the same UE and has close values $A(TO^*) \approx A(ATO^*)$. Then we adjust the value $A(ATO^*)$ for the found ATO^* : $A(ATO^*) =$ (the minimum value of $A(TO)$ for all TO s that were included in ATO^* at the step 3). To the list of the following for ATO^* , we include the following ATO s for TO^* : $R(ATO^* \rightarrow \{ATO\}) = R(ATO^* \rightarrow \{ATO\}) \cup R(TO^* \rightarrow \{ATO\})$.

If no such ATO was found for the selected TO^* , then we create a new ATO^* in the set $N\{ATO\}$. We set its parameters in accordance with TO^* , on the basis of which it is created: $Id(ATO^*) =$ sequence number; $UE(ATO^*) = UE(TO^*)$; $A(ATO^*) = A(TO^*)$.

4. Adjustment of ATO s characteristics from the set $N\{ATO\}$:

For each ATO^* from $N\{ATO\}$, we review $TO \in K\{TO\}$, which were included in its on the previous step. For each $TO \in K\{TO\}$ we go through all the previous TO (chain of TO in reverse order of their production, possibly with ramifications), which are made in the same unit, until we come across TO , which are produced in another unit. The set $F\{TO\}$ is supplemented by these last TO s; and for these, the ATO^* is specified as follows — $R(TO \rightarrow \{ATO\})$ is supplemented by a reference to the ATO^* with the corresponding occurrence.

For all TO s that have been reviewed for a given ATO^* together with their predecessors (excluding those included in $F\{TO\}$), we include them in the given ATO^* and adjust the ATO^* characteristics accordingly: we add the need NR to the corresponding ANR component of the given ATO^* : $ANR = ANR + NR$ (of new TO s); add the need PF fund to the corresponding APF component: $APF = APF + PF$ (of new TO s). The duration of ATO^* ($D(ATO^*)$) is adjusted to the maximum duration of TO s chains that are part of ATO^* . For each TO , with which the set $F\{TO\}$ was supplemented, the readiness advance is determined as the advance of the start of the corresponding ATO^* : $St(ATO^*) = A(ATO^*) + D(ATO^*)$.

5. Selection of priority ATO from the set $N\{ATO\}$:

One of the $N\{ATO\}$ — ATO^* is chosen as filled, removed from the set $N\{ATO\}$ and assigned to the set $Z\{ATO\}$. The criteria used to evaluate the priority of the selection are: the minimum advance of the launch: $St(ATO^*) = \text{Min}(St(ATO); ATO \in N\{ATO\})$.

$TO \in F\{TO\}$, which refer to the selected ATO^* are assigned to the set $K\{TO\}$ and removed from the set $F\{TO\}$;

- If $K\{TO\} \neq \emptyset$, then proceed to step 3;
 - If $K\{TO\} = \emptyset$, then proceed to step 6.
6. Assessment of completion of the algorithm:
- If $N\{ATO\} \neq \emptyset$, then proceed to step 5;
 - If $N\{ATO\} = \emptyset$, then complete the algorithm.

End of A2.

A diagram, explaining the sequence of steps 3÷5 of algorithm A2 is shown in Fig. 3

Chains TO within $N\{ATO\}$ marked with the same color enter the same ATO only when the advance of their final TO s is close — within the given parameter. The colors of connected ATO and TO , which are in different sets, cannot be the same.

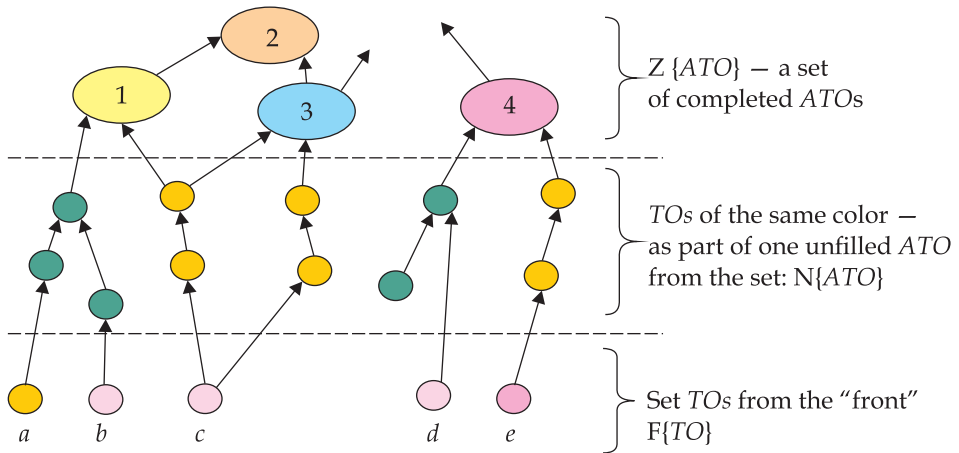


Fig. 3. Scheme for algorithm A2. The color indicates the UE performing the ATO and TO

Let's admit, that in step 5 an ATO^* will be selected, which includes the TO s marked in green. In the set $Z\{ATO\}$ ATO^* will appear in green, the following for which: ATO 1 and ATO 4. TO a, b, d will be assigned to the set $K\{TO\}$ in step 5 and transferred in step 3 from the set $K\{TO\}$ to the set $N\{ATO\}$; while $TO: \{a\}$ will join an already existing ATO with the same color constituents of TO , and $\{b, d\}$ will form a new ATO , since there are no corresponding colors among $N\{ATO\}$ for these TO s. In step 4, the new TO s a, b, d will be continued by the previous ones according to DTS :

- those of the previous ones performed by the same UE (will have the same colors as the corresponding new one) will be part of the formed/replenished $ATOs$ and will be used to adjust their characteristics;

- those of the previous ones, which are performed by another unit, will complete the process of searching for previous ones and will enter the set $F\{TO\}$.

Additions and comments to the A2 algorithm are given below:

1. Let us prove that the ATP constructed by the A2 algorithm does not contain closed paths. At each step 5, some ATO^* is selected from $N\{ATO\}$, which refers to already filled $ATOs$, since the $N\{ATO\}$ includes TO s only previous to the already completed ATO . On the other hand, the ATO^* selected in step 5 can be referenced only by $ATO \in N\{ATO\}$ that are not filled yet; TO s preceding ATO^* can be included only to still unfilled $ATO \in N\{ATO\}$. Thus, the set of $ATOs$ referred to by any ATO^* (directly or indirectly) does not intersect with the set of $ATOs$ referred to ATO^* (directly or indirectly), so closed paths in the constructed ATP graph are impossible.

In the given proof and in algorithm 2, as well as in Figure 3, the case when intermediate TO s from the chain are connected by the "previous-next" relationship with TO s that are not part of the ATO , to which the chain belongs is not taken into account. In this case, there are no guarantees that the connections between $ATOs$ will not form a closed path. To reduce this probability, it is possible to use a reduction in the TO combination tolerance with different advances. In the unlikely event that a closed path is formed, it can be removed in dialog mode. A certain complication of the A2 algorithm is also possible, which we will leave outside the scope of this article.

2. Step 4 of the algorithm can be adapted to determine the restrictions on the consumption of *APF* and *ANR* components, in particular those specified at the beginning of section 3. When joining the *TO* to the *ATO*, not only the total need for *APF* and *ANR* is determined, but also its distribution by time periods into which the *ATO* performance period is divided; such a division can be established by the structure of the *ATP* model and used in determining the composition of *ATO*.

3. *DTS* usually presents variants of *AG&S* production, which differ in *PA* composition and/or the method of their production — depending on the *G&S* copy number. When building *ATP*, we use the option specified as a parameter. All other *DTS* variants must not violate the *ATP* structure, i.e., must not have *TOs* that cannot be classified as *ATOs* according to the rules of the *A2* algorithm. If such design/technological modifications are necessary, then it will be necessary to introduce a new *G&S*, create an *AG&S* group for it and build a separate *ATP* for it. This condition is related to volume-calendar planning decomposition algorithms, which are simplified if it fulfilled.

4. In a situation where the sequence of *TOs* performed in one *UE* includes a short-lived *TO* performed in another *UE* returning for further processing to the same *UE*, it is possible to ignore such a step to the other unit to simplify the *ATP*. Such situations can be resolved through mutual services between *UE* at the level of building detailed plans. Algorithm *A2* can be easily adapted, if at step 4, when passing through the *TO* links, we come across a *TO* that is performed in another *UE*, evaluate the possibility of skipping the latter due to the short duration of the *TO* or by a certain *UE* performing it.

5. Models with the *ATP* structure can be built for different levels of enterprise management: departments, workshops, etc.; at the same time, they must be nested within each other. This is possible because the structures of the input data repeat the structures of the output. As an initial model for building *ATP* of a certain level, you need to use either a detailed *DTS* or an aggregated one of an immediately lower (more detailed) level, so that the formed aggregates can be easily decomposed into constituent components. The same applies to the construction of *ATP-V* (item 3.2), for the construction of which it is possible to use the pre-aggregated immediately lower level.

3.2. Aggregate Technological Process for Volume Planning. *PPM-V* are used for *volume planning* (*VP*) at the highest level of enterprise management and for the most remote period of time and therefore allow the highest degree of aggregation and simplification of the model structure. In particular, the structure of the *ATP-V* model is a simplified version of *ATP* — it fixes: the duration of *ATO-V*; their mutual location in time; use of *APF* and *ANR* during *ATO-V* performance discretely. Thus, the term of readiness of the product position of the enterprise (*AG&S-V*) completely determines the terms of production of *ATO-V*, which are part of it, as well as the volume of consumption of *APF-V* and *ANR-V* within the limits of execution of *AG&S-V*. *PPM-V* focuses more on determining *what and in what quantities to sell and buy* than *when to produce and consume*. Taking into account the possibility of equalizing the consumption of resources in time at lower levels of management, we will allow unevenness of their consumption in time when planning using *ATP-V*.

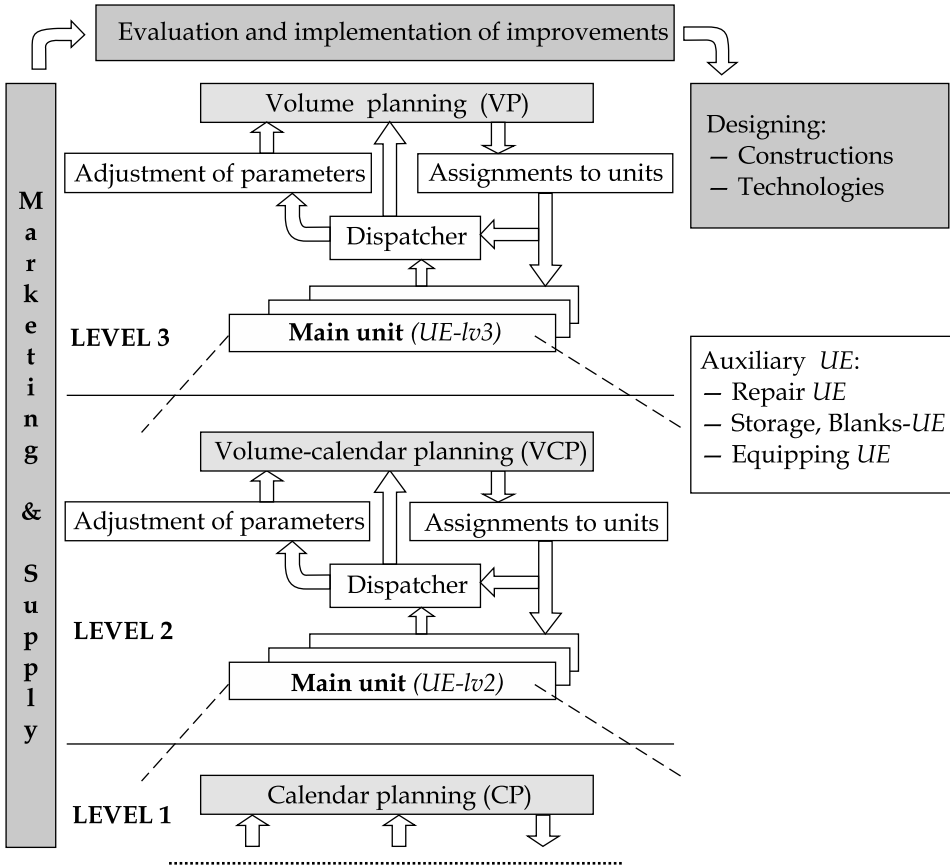


Fig. 4. The structure of the 3-level enterprise management system (simplified). Management of UE-lv1 (PF) is carried out in the same way as for other levels

ATP-V is usually built on base of ATP. The composition of the G&S group (AG&S-V), which are planned by one ATP-V, includes those with similar ATP; one of them is chosen as a typical representative, for whom ATP-V is being built. The same as for ATP of any degree of aggregation:

- the required specification of ATP-V will be carried out at the stage of decomposition of the plan, built on its basis (in the form of ATOs that were used during the construction of ATP-V);
- adjustment of ATP-V parameters, depending on the time of their execution (and therefore the variant of ATP used) is carried out expertly by G&S designers.

The ATP-V construction algorithm is practically no different from the A2 algorithm, but:

- G&S use ATO parameters that belong to ATP instead of the corresponding TO parameters;
- ATP construction results are interpreted according to ATP-V structure.

3.3. The Structure of a Multi-level Production Management System. Next we consider a 3-level enterprise management system. In Figure 4 shows its simplified version to explain the interaction of the PPMs system in the management process.

Block: “Sales & Supply” predicts and coordinates mutual relations of *UE* with consumers and suppliers of the enterprise at all 3 levels of management. This ensures a single representative from the enterprise for interaction with related enterprises.

Powers of “Auxiliary *UEs*” are determined based on the service needs of the main ones; operational management is carried out through the ordering of their services by consumers in accordance with the established service regulations specific to each of the auxiliary *UEs*. The planning of the processes of auxiliary units is done separately, using models similar to those for the main units.

The “Dispatcher” block takes part in the coordination of *UE* plans of the corresponding level: among themselves; with related enterprises (through “Sales & Supply”); interprets the state of a higher-level plan based on the plans of lower-level *UEs*. In the case of significant deviations of the interpreted state from the state provided for by the higher-level plan, the higher-level planning block makes a decision to restructure its plan.

The block “Adjustment of parameters” analyzes the deviations of the planned tasks of the *UE* from the detailed plans, by which they are implemented, investigates the reasons for the deviations and adjusts the parameters of the corresponding planning models.

The “Design” block studies the needs of consumers, the capabilities of suppliers and designs the production of *G&S* (see section 4).

The “Evaluation and implementation of improvements” block collects proposals from the company’s personnel and external stakeholders, regarding the functioning of all the company’s systems, evaluates the feasibility and possibility of their implementation, in particular, plans tasks for the design of “*G&S* for own needs” and orders projects to external organizations.

Next, we will consider in more detail the functions and implementation of some of the blocks presented in the diagram.

3.4. Volumetric Planning (VP). The enterprise plan is built based on forecasts of external market conditions, which are created by many manufacturers and consumers. We believe that our company practically does not affect these conditions. The task of an individual enterprise is to use these conditions to achieve maximum financial success. VP is built with such a goal and with minimal restrictions on the use of the available potential and wide possibilities of adaptation to the conditions prevailing on the market.

The task of VP is to guide the current activity of the enterprise, the results of which will affect the activity in distant periods. Such activities include:

- the work of designers and sales departments of the enterprise, who study the needs of the modification of the enterprise’s products and forecast the demand and prices for *AG&S-V*, which can be achieved due to certain design improvements;
- the work of technologists of the enterprise and supply departments, who improve existing technologies and evaluate proposals of designers, regarding the cost of manufacturing future *AG&S-V* options;
- conversion of production capacities to adapt them to future production needs;
- selection and training of employees for their work in conditions of future technologies.

The planning algorithm based on the *ATP-V* model should allocate *AG&S-V* to *ATS-V* discretely in such a way as to ensure the best trajectory of the company's movement in monetary terms: by obtaining the maximum income from the sales of *AG&S-V* and minimal costs for the purchase of additional resources and services, as well as for labor costs. In addition, it is important for the enterprise as a whole to load the available resources proportionately: selling equipment or laying off employees is not desirable from many points of view. A change in the company's capacity is possible, but it must have the prospect of use beyond the planned period. At the enterprise level, it is advisable to cooperate with banking institutions: if there is a lack of funds for the production of profitable *AG&S-V*, or if there are reserve funds, the use of which can be postponed until the need for them appears. It is also necessary to take into account tax payments to state bodies. A long period of time may be used to carry out planned calculations (item 3.6). This circumstance makes it possible to involve experts in forecasting the parameters of the VP calculation.

Next, the volume planning algorithm is presented, which involves the participation of experts in forecasting external circumstances, as well as in determining the possibilities of improving the consumer qualities of *AG&S* due to design improvements and reducing their cost price due to the improvement of technology.

Algorithm A3 (VP)

1. In the dialog mode for the VP extension period, we define:

- available *APF-V* time funds and *ANR-V* supply plans, which are coordinated with suppliers;
- to estimate the possibilities of changing *APF-V* power and *ANR* supply:
 - price forecasts for *ANR-V* and *APF-V*, which can be used in the manufacture of *AG&S-V*;
 - forecasts of personnel recruitment and training opportunities, in particular, what can be used in production and provided with equipment;
 - financial resources of the enterprise at the beginning of the extension period;
 - forecasts of conditions that will be provided by banking institutions, in particular, profit on loans and deposits;
 - forecasts of demand for *AG&S-V*, which will be expedient to produce and their prices, taking into account possible improvements;
 - forecasts of a possible reduction in the cost of *AG&S-V* due to technological improvements of *ATP-V* and taking into account design improvements.

Forecasts of the specified parameters are tied to *ATS-V* discretely and allow errors in estimates.

2. The initial production state for VP construction is determined based on the VCPs, constructed for *UE level 3 (UE-lv3)*. The initial state construction algorithm interprets the VCP of the specified *UE* in terms of *PPM-V*. It is quite universal for related management levels and is described in item 3.7.

3. Completion of the status of VP by the next *AG&S-V*; this intermediate state of the VP is schematically depicted in Figure 5.

ATS-V discretely are filled with *AG&S-V* needs in *APF-V* vector components during the planning period. One color shows the use of several vector components by the same *AG&S-V* during several *ATS-V* discrete.

At step 3, one of the *AG&S-Vs* is selected (from those defined for planning in step 1) and the term (*ATS-V* discrete) and the number of its instances for completing the VP are determined. The choice is made by reviewing several options, which are evaluated according to the criterion of changing the total score of the next VP state. Among the components that affect such an estimate:

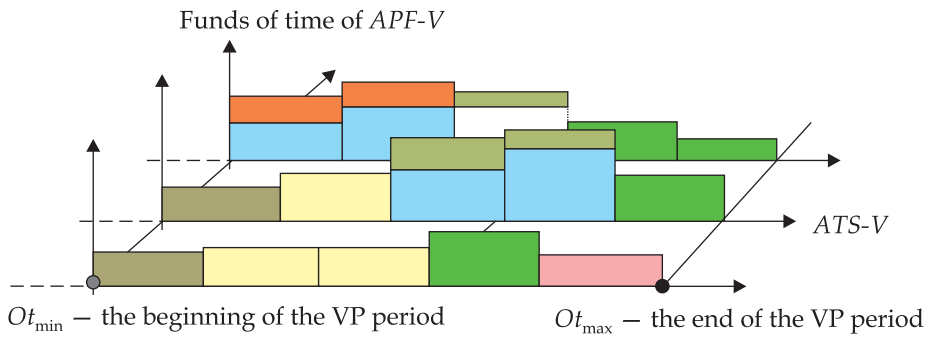


Fig. 5. State of VP construction

a) receipt of funds from the sale of AG&S-V (the earlier the receipt, the higher the score) — increases the overall score;

b) financial expenses for the production of AG&S-V (expenses for both ANR-V and labor costs are taken into account; the earlier the payment of expenses, the higher the score) — reduces the value of the total score;

c) reduction of APF-V underload (for each component of the APF-V vector and discrete time, a coefficient is used that indicates the importance of loading) — increase the values of the overall score;

d) increase in APF-V overload (for each component of the APF-V vector and discrete time, a coefficient is used that indicates the inadmissibility of overloading) — they reduce the values of the overall score.

The evaluation values of points a) and c) increase the overall evaluation, others decrease it (taken into account with a negative sign). The variant of linking AG&S-V to VP with the highest positive evaluation is accepted as the result of every step 3.

4. If in step 3 a variant of VP addition with a positive evaluation is found, then it is accepted and step 3 is repeated with a new state of VP. Otherwise, the algorithm terminates and its results (the resulting VP state) are available for user analysis.

End of A3.

The results of the algorithm A3 are drawn up in the form of the trajectory of the enterprise in monetary terms and deviations of resource consumption from those predicted or agreed with related enterprises. The imbalance can be eliminated by:

- changes in projected prices for AG&S-V due to improvements in their consumer qualities;
- changes in consumed resources for the production of AG&S-V due to technological improvements;
- clarification of the forecasted and coordinated supplies of APF-V, ANR-V resources.

If it is impossible to reconcile the imbalance, the A3 algorithm can be run with other forecast values of the parameters, as well as the coefficients of penalties for exceeding the need for APF-V or their underloading. An imbalance of resources is permissible in principle, but it will require compensation for the internal costs of UE-lv3. Penalties for imbalance are those additional internal costs for which a compromise must be found with external profits associated with the production of profitable AG&S-V and not the production of unprofitable ones that could load unused resources.

In parallel with the VP calculations for the main production, calculations are carried out regarding the capacity of auxiliary units using the service standards, established on the basis of the analysis of the operation of the enterprise.

3.5. Volume-calendar Planning (VCP). For *UE-lv3* as G&S will be *ATO-V* — a set of *ATO* results, that are transmitted outside the *UE*; each of them has its own *ATP*. Each such *AG&S* may be one of next:

- is transferred as processing items to another *UE-lv3* or;
- is transferred outside the enterprise) or;
- used as a subject of processing for *ATO-V*, which release date is outside the planning period for *UE-lv3*.

VCP is carried out for each *UE-lv3* independently with the following agreement: between *UE-lv3*; with related enterprises (through sales and supply departments); with a higher-level Dispatcher who is interested in following the higher-level plan.

External constraints for *UE-lv3* are obtained as a result of decomposition of the planned task from a higher level. When building the VCP, we refine the obtained rough restrictions in such a way as to obtain the best conditions for our unit, followed by their coordination as described in item 2.3:

- we allow inconsistencies with *AG&S* readiness plans established by VP — with subsequent coordination with consumers;
- we allow inconsistencies with *ANR* supply plans established by VP — with subsequent coordination with *ANR* suppliers;
- we allow inconsistencies with the plans for the supply and installation of new equipment established by the VP — with subsequent coordination with equipment suppliers;
- we allow inconsistencies with the recruitment and training plans of personnel established by the VP — with subsequent coordination with the personnel management service.

Internal losses are those that lead to an increase in the tension of *UE-lv2* plans and for which they will demand compensation at the stage of their acceptance of planned tasks. When building the VCP, the planner estimates the amount of compensation that will have to be paid to the executing units:

- we allow compatible (overlapping) execution of *ATOs* that are in the “previous-next” relationship — *UEs* will have fewer opportunities to choose the order of launching *PAs*, in particular, combining them in a party;
- we overload/underload the use of *APF* — the intensity of planned tasks increases not only in the executor’s unit, but also in the one that performs equipment repair due to the increase in the intensity of its use.

In the same way as it was previously described regarding the CP (item 2.3.), the VCP is restructured according to the results of agreements with the new coefficients of penalty functions for violation of restrictions in order to achieve benefits from the compromise of internal losses (compensations to its units) and mutual fines with neighbors.

3.6. Prolongation of Plans of Different Levels of Aggregation. In Figure 6 time intervals are plotted along the time axis T (marked by rectangles; the arrow on the time axis indicates the end of the interval; the scale is conditional),

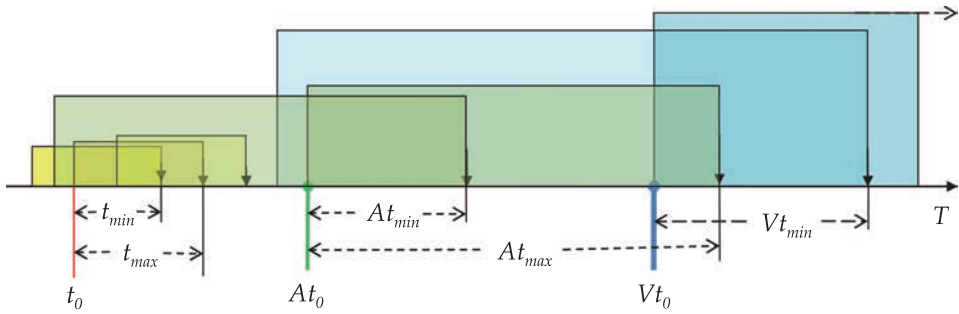


Fig. 6. Scheme of extension of plans of different levels of aggregation

which represent the periods of existence of the plans: CP ($t_0 \div t_{\min}$, $t_0 \div t_{\max}$); VCP ($At_0 \div At_{\min}$, $At_0 \div At_{\max}$); VP ($Vt_0 \div Vt_{\min}$, ($Vt_0 \div Vt_{\max}$ — outside the picture)). For each level, the moments of prolongation are at the beginning of the corresponding interval; one of them is marked: t_0 — for CP; At_0 — for VCP; Vt_0 for VP.

The VP of the enterprise is built periodically so that the minimum interval of its existence is not less than Vt_{\min} ; in particular, at the moment Vt_0 , the VP is extended to Vt_{\max} . The period between successive prolongations is $V\tau = Vt_{\max} - Vt_{\min}$. $V\tau$ is also the interval for which the VP is extended.

Each UE-lv3, which is a unit of the enterprise, builds an VCP periodically so that the minimum interval of its existence is not less than At_{\min} , in particular, at the moment At_0 , each UE-lv3 receives a scheduled task (its part of the VP) for the period up to At_{\max} , decomposes it and prolongs its VCP. The period between successive prolongations is $A\tau = At_{\max} - At_{\min}$. $A\tau$ is also the interval for which the VCP is prolonged.

Each UE-lv2, which is a subdivision of one of the UE-lv3, builds a CP periodically so that the minimum interval of its existence is not less than t_{\min} , in particular, at the moment t_0 , each UE-lv2 receives a scheduled task (its part of the VCP) for the period up to t_{\max} , decomposes it and prolongs its CP. The period between successive prolongations is $\tau = t_{\max} - t_{\min}$. τ is also the interval for which the CP is extended.

3.7. Interpreting a Lower-level Plan as Initial State of a Higher-level Plan.

The initial state for plan prolongation at each level is defined as the final state of the existing plan of the corresponding level. In case of violation of the current plan, it may be necessary to adjust it out of the ordinary, similarly to what was indicated in relation to the CP (item 2.2). In the event that the planned task issued to a lower level of management cannot be fulfilled — it is interpreted at a higher level with significant deviations from the expected state, it is necessary to rebuild the plan of the higher level. A lower-level plan is used as an initial state, which is interpreted in the concepts of a higher-level model. This initial state does not change until an extension (or rebuild) of the lower-level plan is required. That is, higher-level plan calculations can continue for the lifetime of an unchanged detailed plan without the risk of becoming obsolete due to a change in the initial state. This property of the higher level of control relying on the lower level UEs planning their activities gives those advantages over technical auto-

matic control systems — the planning receives a non-changing initial state for calculation.

To explain the algorithm of interpretation of the lower-level plan in terms of the higher-level model, we will take PPM-B as a lower-level model and PPM as a higher-level model. The initial state creation algorithm for VCP construction interprets the *UE-lv1* plan in the form of *ATO* completion times according to the CP, as well as *APFs* occupied by them and *ANRs* used.

Algorithm A4 (interpretation of the initial state of the VCP)

1. We select *AG&S*, which are expected to be planned, the given release dates of which are within At_{max} . We are starting to review *AG&S* with shorter terms of readiness. For each selected *AG&S*, a *DTS* option must be defined, in advance agreed with the customer.

2. We choose the next *AG&S*. Similar to algorithm A2, we go through the *DTS* of the selected *AG&S* from its final *TO*.

3. We form the initial *TO* “front” for the selected *AG&S* — the set $F\{TO\}$ similar to step 2 of algorithm A2.

4. We choose the next *TO* from the “front” $F\{TO\}$.

We check the presence of the selected *TO* in the detailed CP of the corresponding unit:

a) if such a *TO* is present, then it and all previous ones are either present in a detailed plan or completed:

— they do not need to be included in the *ATO*; it is enough for the *ATO* that contains the selected *TO* to set/adjust the readiness period, which should be the maximum (according to the detailed plan) among all *TOs* found for the given *ATO*;

— they are marked as having found their application in the detailed manufacturing plan of the selected *AG&S* and are not checked in subsequent steps;

— the resources that are planned in the CP for this and previous planned (but not executed) *TOs* are removed from those available for their use to build the VCP; *PF* and *NR* residues will be represented as *APF* and *ANR* and used in VCP construction;

b) if there is no *TO*, it is included in the *ATO* along with all previous ones performed in the same unit: the *APF* and *ANR* they need are added to the needs of the given *ATO*. Intermediate *TOs* for included ones performed in other units (as part of other *ATOs*) complement $F\{TO\}$.

5. We check the presence of *TO* in the “front” $F\{TO\}$:

— if present — proceed to the next step 4; — otherwise, the *ATP* of the next *AG&S* is adjusted by those available in the detailed *TO* plan; proceed to step 6.

6. We check for *TOs* in the detailed plan, that were not used in the revised *AG&S*:

a) if present, the *TO*, checks for unrevised *AG&S* that are expected to be performed within the limits At_{max} :

— if they are present, then proceed to step 2 (choose the next *AG&S*);

— otherwise, in the detailed plan there will be *TOs* that are not included in any *ATO*, that belong to those, selected for the construction of VCP *AG&S*; such *TOs* are passed on to the user for analysis;

b) if in the detailed plan all *TOs* have been used, then the algorithm is complete. VCP of all *AG&Ss* earmarked for planning are adjusted by detailed plans. For some *AG&Ss* with set dates within At_{max} , VCP adjustments may not be necessary.

End of A4

Partially planned *ATOs* for which readiness dates are determined based on the detailed plans (step 4a) but remain unplanned by the detailed *TO* plan (step 4b) require an adjustment of the duration of execution (for example, in proportion to the volume of resource requirements).

A new initial state for the construction of the VCP may be needed both when transitioning to the VCP planning, and in the event of the need to adjust the VCP in connection with the violation of the planned tasks at the level of the CP, offered

by the units. The level of violations that require the restructuring of the control center is determined by the Dispatcher of the appropriate level, who evaluates deviations from planned tasks.

3.8. Assignment to Units: Decomposition of Aggregated Plans. The process of decomposition (detailing) is the reverse of aggregation and consists in determining the composition of already planned aggregated operations (*ATO* for *VCP*, *ATO-V* for *VP*). It is carried out with the aim of issuing planned tasks to units — executors of aggregated operations, when the time has come to extend their plans. Consider the decomposition algorithm using the example of the decomposition of *ATO* into *TO* for *UE-lv2*.

Only those *ATOs*, whose terms are defined by the constructed *VCP* within the period for which the detailed plan is expected to be extended (up to the moment t_{\max} , item 3.6), are detailed. We believe that the planned tasks have already been issued to the units by the time t_{\min} . For each copy of *AG&S*, the *ATO* of which is supposed to be detailed, the *DTS* variant, according to which it is produced, must be defined; prior to that, the *AG&S* manufacturing plan exists in a form that allows for various specification. If the *DTS* option affects the consumer properties of *AG&S*, the choice must be agreed with the consumer. If the *DTS* option affects specific *NR* and *PF* needs, the selection must be coordinated with the executing unit's capabilities and those units that affect those capabilities: the supplier and the Store. To simplify such agreements, *DTS* options for one *AG&S* should be selected that are close in terms of consumer properties and execution technology.

Algorithm A5 (decomposition of *VCP*)

1. Determine the list of *AG&S* whose *ATOs* are scheduled within the period $t_{\min} \div t_{\max}$ — $P\{AG\&S\}$.

2. We choose the next *AG&S* from $P\{AG\&S\}$ and exclude it from $P\{AG\&S\}$. Similar to algorithm A2, we go through the *DTS* of the selected *AG&S* from its final *TO*.

3. We form the initial *TO* "front" (set $F\{TO\}$) for the selected *AG&S*, similar to step 2 of algorithm A2.

4. We choose the next *TO* from the "front" $F\{TO\}$; we check certain conditions according to which we perform actions:

a) If the *TO* is part of the *ATO*, which is scheduled beyond t_{\max} , then it is skipped together with the previous ones that are performed in the same unit until the *TO* is found in the previous *ATOs* and we fill $F\{TO\}$ with them. We exclude the selected *TO* from $F\{TO\}$ and proceed to step 5;

b) If the *TO* is part of the *ATO*, which is planned within the period $t_{\min} \div t_{\max}$, the *TO* is included in the planned task for the unit that performs the *ATO*; the result of the found *TO* is a the item of unit task with a lead time equal to the *ATO* lead time. Prior to the found *TO*, which are performed in the same unit, will be scheduled within their unit; previous ones performed in another subdivision (included in another *ATO*) add $F\{TO\}$. We exclude the selected *TO* from $F\{TO\}$ and proceed to step 5;

c) If the *TO* is part of the *ATO*, which was previously detailed — its composition was already brought to the unit as a planned task or the *TO* was included in the *ATO* composition at the stage of determining the initial state by the A4 algorithm and is already present in the detailed plan — such *TO* and all its predecessors are omitted. We exclude the selected *TO* from $F\{TO\}$.

5. We check the presence of *TO* in the "front" $F\{TO\}$:

— if present — proceed to the next step 4;

— otherwise, a planned task regarding the execution of the selected *AG&S* is issued for units within the period $t_{\min} \div t_{\max}$. We exclude the selected *AG&S* and proceed to the next step 6.

6. We check the presence of AG&S in the selected list $P\{G\&S\}$:
— if they are present, then we proceed to the next step 2;
— otherwise, the algorithm is completed. Planned tasks are issued to units in the form of TO readiness terms, the results of which are transferred to other units.

End A5

Algorithm A5 can be slightly improved if, in step 4a, we remember the composition of ATOs whose manufacturing term is still outside t_{\max} and use it when the term of this ATO falls within the required limits. The composition of such ATOs cannot be changed — the version of the AG&S instance intended for the decomposition algorithm remains unchanged because the changes in the DTS are interconnected and are made in a complex manner.

The unit's planned task is evaluated by its management, as described in item 2.3. In detailed planning, it will be used as a norm, deviations from which are agreed between units on the basis of mutual fines. Parties, interested in negotiations, will also be:

— block “Sales & Supply”—regarding delivery of G&Ss from the enterprise and NR to the enterprise;

— equipment repair unit — regarding schedules of planned equipment repairs;

— technological department — regarding the equipping supply schedules, agreed at the VCP;

— the Dispatcher who coordinates the product positions of units that are planned to be used as NR in the ATO, for which a planned task has not yet been issued.

Units also prepare data on the balances of APF, ANR within the limits of t_{\max} as an initial state for adjusting the VCP. The Dispatcher can use the data received from the units for comparison with the existing VCP and provide information for making a decision on its reconstruction.

4. Financial Accounts of Units

The basis for introducing a system of coordination between UEs of different levels is their separate financial accounts. The receipt of funds to the UE's account is planned when a planned task is issued to it by a higher-level UE. These funds should be enough to pay employees (both temporary workers and those on hourly wages). Also, these funds should cover additional costs associated with the intensity of the issued planned tasks (payment of overtime, small batch sizes, regulatory shortages, etc.). The unit can reduce internal costs and receive additional funds due to coordination of plans with adjacent units — units settle among themselves from their own accounts, seeking to minimize internal costs (item 2.3).

Neighbors for UEs of any level can also be other enterprises with which interaction takes place through the “Sales & Supply” block. Settlement for mutual services takes place through the enterprise level — the UE does not receive funds from another enterprise directly to its account and is not settled from its own account.

The UE may pay a fine to the higher-level unit that issued the planned task to it in the event that the state of the higher-level plan, when interpreted by the detailed plan of the given level, has undergone significant deviations and needs to

be rebuilt. Calculations should be made through the Dispatcher who interprets the detailed plan. Changing the task of a unit after it is accepted is a rare case, since in the considered algorithms, planning can start no earlier than from the existing plan of units of a lower level. The reverse direction of process modeling has significant disadvantages and was not considered by us.

Unit's accounts can also be used to organize a system, that will interest employees in the general financial results of the enterprise and the units of which they are members. Consider the following scheme. The enterprise and each *UE* will strive to obtain the maximum financial result, as it will affect the amount of bonuses for each employee. Of course, after all mandatory payments, including settlements with services and production units, the enterprise and its *UE* have reserve funds, part of which can be used for incentives — the premium fund. Decisions are made with the participation of representatives of all units of a given level regarding the size of the premium fund and its distribution according to formal indicators, agreed in advance, as well as a result of informal discussions. Each participant in discussions strives to achieve better formal indicators and also to receive a positive assessment from other participants. Similar decisions regarding the distribution of the premium fund take place both at the level of the enterprise, whose premium fund replenishes the premium funds of *UEs* of a lower level, and at all other levels and units, which in turn replenish the premium funds of units of lower levels.

Developers — designers, technologists and rationalizers from any department — are evaluated by the effectiveness of the implemented improvements. The team of developers must determine the degree of participation of each participant and distribute the received premium funds accordingly. Developers should be interested in spreading their inventions at least within the enterprise:

- any improvement should be taken into account when normalizing work for the next planning;
- dissemination of inventions contributes to the overall efficiency of the enterprise.

5. Design Models

The design of new *G&S* or the modification of the design of existing ones involves the study of consumer processes, forecasts of future needs, as well as proposals for the manufacturability of products. Design criteria are consumer value (utility for the consumer) and cost price (manufacturing costs).

The design of the product is a set of components that are connected by interaction in such a way that certain relationships are maintained between the attributes of these components. Components for construction and possible methods of their interaction are introduced in advance from construction experience. On the set of such components and connections between them, relations are provided: abstract — concrete, part — whole and similar with different degrees of similarity.

Design involves presenting the product as a collection of interconnected *aggregated/abstract components-converters (AAC)* of incoming flows of materials, energy, and signals. The highest level of abstraction is functional converters, which

abstract from the material that undergoes changes [11]. The process of designing a complex product consists in detailing the AAC and linking them together. Detailing can take place in several stages, depending on the complexity of the product.

Algorithm A6 (design-construction)

1. We set the desired function for the G&S project, presented in an aggregated/abstract form — its functioning and interface can be clarified in the process of detailing.

2. Among the implemented or described G&S, we select similar ones (with a degree of similarity not less than the given one). We will use the AAC components and interfaces in the selected G&S in the following steps.

3. G&S detailing: we select the necessary ones from the received AACs and link them together in such a way as to implement the desired function. Connection involves choosing the type of connection (interface) and setting its parameters. If it is not possible to achieve the goal, we expand the set of AAC and interfaces for construction:

- step 2 is performed with reduced G&S similarity requirements;
- aggregate and abstract from the functioning and interfaces of the provided AACs;
- we use the components of the provided AAC and interfaces and specify them;
- we change the requirements for G&S and coordinate them with consumers and adjacent AACs of the project.

After expanding the set of components for the projected G&S, we continue the selection of components and setting their parameters to implement the desired function.

4. If the required level of detail is reached, then the project is completed; otherwise, among the AACs, detailing the project, we select the next one for further detailing, consider it a new G&S for designing and proceed to step 1. After detailing the selected AAC, we connect it to the project of the initial G&S. In the process of detailing the AAC, coordination is carried out between the interacting AACs of the same project.

End of A6

The following are comments and additions to the A6 algorithm.

1. When detailing components, it may be necessary to coordinate their interaction and redistribute functions. A change of the general G&S interface is not excluded. When evaluating decisions regarding options for the redistribution of functions between AACs and detailing their interaction, they strive to improve the overall project criterion: alternatives are accepted in the case, that the “benefits” in one of the components exceed the “losses” in the adjacent one.

2. For complex projects, it is assumed to highlight several of their interdependent aspects, which are detailed in parallel and in agreement. In particular, UML [11] provides several types of diagrams (classes, states, activities, etc.), that describe the project in different sections. UML can be used at higher levels of design for various subject areas. There are specific methods and software tools for specific subject areas.

3. The design experience is generalized: new AACs are created both by aggregation and abstraction, and by regrouping the structure of existing ones; the similarity ratio is also refined based on which third-party components have proven useful for detailing the G&S or AAC we need.

4. For the proper functioning of the main G&S component, *auxiliary* ones may be needed, the requirements for the functioning of which are determined by the main one; algorithm of their construction is similar to A6. A *control system* may be required to ensure the interaction of the design components. Its design is carried out in a similar way, based on the function it must perform: to measure the

parameters of the main component and its environment and influence the functioning of the main component.

5. After creating a new G&S project and launching it into production, the process of its improvement takes place. The organization of such a process requires documentation for the G&S project with different degrees of aggregation and justifications for the decisions made to quickly inform the developer: how it is possible to change the functioning and which subsystems are affected by the new option.

6. Since the design processes take place in stages — first the aggregated structure of the project is determined, then the detailing of each of the AACs takes place, then a plan is required for the execution of detailing work, which will identify the executors involved in the detailing of certain AACs of the project and the deadlines for obtaining agreed decisions. To draw up such a plan, it is possible to apply calendar planning models, but with the particularity that: standards of performance of works for them are poorly predictable; the work schedule itself has alternative paths due to the fact that the result of the previous work affects the necessity and performance parameters of the following ones. Design models often include not only mathematical calculations and modeling, but also the creation of prototypes and their testing, the results of which affect the options for subsequent works. Examples of project planning are given in [7].

7. The G&S design is used to design the *TP*. The principle of *TP* design is similar to structural design, but instead of *PA* components, process components are used that transform materials into parts and combine them into assemblies. The *TP* system of various degrees of aggregation and abstraction is prepared and organized in advance. The *TP* design algorithm is similar to A6: for the manufacture of AAC (its part or several parts of different AAC), AAC-processes that were used for processing similar AAC are selected and the required AAC-process is constructed from them. The system of AAC-processes does not correspond to the AAC system used for construction and does not fit into the *ATO* system used for planning — it is convenient for each of the developers to think in their own system of structural elements.

8. The design of *TP* can take place in parallel with the design of the structure — technological solutions are somewhat behind the development of the structure because they must implement the designer's ideas. The technologist assesses the possibilities of manufacturing AAC: available equipment; the need to purchase a new one; production of equipping; personnel training, and also agrees with the designer on the options of AAC that simplify production. At the same time, it uses changes in the design at different levels of aggregation, and adjusts its decisions regarding AAC-processes at the corresponding levels of aggregation. On the other hand, the technologist adjusts the *ATO* standards, related to changes in AAC-processes, and from production plans receives information about its scope for making decisions regarding the purchase of equipment, allowable costs for the production of equipping and the organization of FPL (backward arrow in Fig. 7).

To accelerate the implementation of design and technological improvements, as well as to ensure their interaction, the stages of construction, *TP* design and planning can be partially combined in time (Fig. 7).

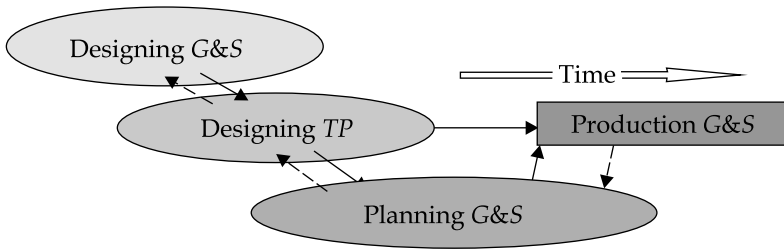


Fig. 7. Combining the designing, planning and production stages of G&S in time

In the design process (until its completion), decisions are made that, on the one hand, can be used in the design of the *TP*, and on the other hand, to evaluate the possibility and effectiveness of the implementation of constructive solutions (back arrow from the “Designing *TP*” block to “Designing G&S”).

It is possible to start planning the production of G&S at higher levels of management before the design is completed — it is not necessary to know the detailed *TP*, it is enough to assess the impact of the already adopted design decisions on the parameters of the relevant *ATO*.

In addition to the planned task (CP), for the production of the G&S, a *DTS* is required, the preparation of which is completed when the *TP* design is completed (arrow from the “Designing *TP*” block to “Production G&S”).

When creating a G&S, it is possible to adjust plans (back arrow from the “Production G&S” block to the “Planning G&S” block)

Conclusions

The result of the research is a set of algorithms for planning and design, aggregation and decomposition, which can be applied to build a multi-level (integrated) automated management system of a production enterprise. Algorithm for volumetric planning differs from traditional ones and can be adapted for planning goods with a long manufacturing cycle. Dynamic prolongation of plans of different levels and their interconnection is supported by the considered algorithms. The considered algorithms need additions and specification. Some of them have analogues that are used in existing production management systems. Our goal was to show their interrelationships in a multi-level management system.

Models of calendar planning with alternative variants of the technological processes of their production remained beyond our consideration. These include models of processes: equipment repair, design, testing of product prototypes, etc.

Approaches to determining some parameters of the described algorithms and management system (planning periods, number of management levels, degree of aggregation, etc.), as well as means of supporting forecasting and expert assessments, remained beyond our consideration. To solve these problems, the tools of artificial intelligence are promising — evolutionary algorithms, neural networks, machine learning, etc. An overview of publications in the specified direction is given in [12].

DECLARATION

Declaration of Competing Interest. No potential conflict of interest is reported by the authors.

Funding. The authors declare that no funds, grants or other support were received during the preparation of this manuscript.

Use of AI. The authors declare that Artificial intelligence tools were not used in writing the paper.

Contribution of the authors.

Zelinsky V.A. is responsible for the idea of the paper, the structure of the models and their connection in the integrated management system of an industrial enterprise.

Zelinskyi A.O. is responsible for the description and specification of the planning and design algorithms.

REFERENCES

1. Lypych. L., Khilukha O., Kushnir M. Evolution of the development of enterprise management information systems. *Economic Forum*, 2021, Vol. 11 (4), 85–94. <https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2021-4-12>.
2. Conway R.W., Maxwell W.L., Miller L.W. *Theory of Scheduling*. Dover, 2003, 294 p.
3. Serrano-Ruiz J.C., Mula J., Poler R. Smart manufacturing scheduling: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, Vol. 61, 265–287. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.011>
4. Escamilla J, Salido MA. A dual scheduling model for optimizing robustness and energy consumption in manufacturing systems. *Journal of Engineering Manufacture*, 2018, Vol. 232 (1), 5–16. <https://doi.org/10.1177/0954405415625915>
5. Podchasova T., Portugal V., Tatarov V., Shkurba V. *Heuristic methods of calendar planning*. Technika, Kyiv, 1980, 140 p. [In russian]
6. Hlushkov V.M. On system optimization. *Cybernetics*, 1980, Issue 5, 30–32. [In russian]
7. Heizer, J., Render, B., Munson, C. *Operations Management: i Sustainability and Supply Chain Management*. Pearson, (14th ed.), 2023, 928 p.
8. Silver E. Inventory management and production planning and scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 1999, Vol.18 (5), p. 381. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(99\)90116-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(99)90116-4)
9. Fenta E.W., Tsegaye A.A., Abere A.E., et al. Opportunities in Flexible Manufacturing Systems in the Near Future. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2025, Vol. 26, 247–267. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00437-z>
10. Manu G., Vijay Kumar. M., Nagesh. H., Jagadeesh D., Gowtham. M.B. Flexible Manufacturing Systems (FMS), A Review. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2018, Vol. 8(2), 323–336. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201836>
11. Blaha M., Rumbaugh J. *Object-oriented modeling and design with UML*. New Jersey, Upper Saddle River, 2005, 501 p.
12. Ördek B., Borgianni Yu., Coatanea E. Machine learning-supported manufacturing: a review and directions for future research. *Production & Manufacturing Research*, 2024, Vol. 12 (1), Article 2326526. <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2326526>

Received 11.02.2026

Accepted 25.03.2026.

Published 30.04.2026

В.А. ЗЕЛІНСЬКИЙ, провідн. інженер,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6464-1702>,
zelinsky_v@ukr.net

А.О. ЗЕЛІНСЬКИЙ, студент,
Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА),
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-8310-6061>
antoxa.c@gmail.com

СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ, ПРОЄКТУВАННЯ І КЕРУВАННЯ ДИСКРЕТНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Вступ. Крім процесів виробництва, планування яких відбувається з використанням моделей теорії розкладів та управління запасами, в системі керування підприємством відбуваються процеси проєктування, а також аналіз і коригування моделей, які використовуються і для планування, і для проєктування.

Агреговані моделі виробництва представляють процеси у спрощеному вигляді, що дає змогу планувати на віддалені періоди часу, враховуючи лише суттєві обставини, які можуть впливати на поточні рішення. Результати обчислень агрегованих моделей дають змогу розділити складні детальні моделі на декілька слабозалежних моделей меншої розмірності. Детальні моделі виготовлення товарів та надання послуг використовуються для планування на ближчу перспективу і можуть мати специфічну структуру. Побудовані детальні плани потребують узгоджень між собою і можуть бути використані як початковий стан для пролонгації агрегованих планів. Агреговані моделі конструкцій та технологічних процесів використовуються в задачах проєктування з аналогічною метою — декомпозиції складного проєкту на підсистеми. Крім того, планування виробництва в агрегованому вигляді може починатись ще до завершення детального проєкту — достатньо мати проєкт виготовлення товарів у агрегованому вигляді. Це дає змогу скоротити час від початку розробки проєкту до виготовлення товару.

Метою статті є розгляд системи моделей, які можуть бути використані для автоматизації процесів планування, проєктування і керування виробництвом. Кінцевою метою є створення інтегрованої комп'ютерної системи керування, що може функціонувати без використання паперових носіїв інформації і з максимальним можливим звільненням управління, конструктора, технолога і оператора обладнання від рутинних функцій.

Методи. Робота базується на узагальненні процесів виробництва і проєктування, їх поданні в агрегованому та абстрактному вигляді. Моделювання використовується для перегляду і оцінки варіантів планів. Алгоритми планування виробництва і проєктування пов'язуються в багаторівневій системі керування складним виробничим процесом.

Результати. Розроблені алгоритми планування та проєктування, агрегації та декомпозиції, які можуть бути застосовані для побудови багаторівневої (інтегрованої) автоматизованої системи керування виробничим підприємством. Алгоритм для об'ємного планування відрізняється від традиційних і може бути пристосований для планування товарів з тривалим циклом виготовлення. Динамічне пролонгування планів різних рівнів та їх ув'язування між собою підтримується системою розроблених алгоритмів.

Висновки. За межами статті залишились моделі календарного планування з альтернативними варіантами технологічних процесів їх виготовлення. До них належать моделі процесів: ремонту обладнання, проєктування, випробування дослідних зразків продукції тощо.

Розглянуті алгоритми потребують доповнень і конкретизації. Деякі з них мають аналоги, які використовуються у наявних системах керування виробництвом. Нашою метою було показати їх взаємозв'язки у багаторівневій системі керування.

Підходи до визначення параметрів описаних алгоритмів і системи керування (періоди планування, кількість рівнів керування, ступінь агрегування тощо), а також засоби підтримки прогнозування та експертних оцінок залишились за межами нашого розгляду. Для вирішення цих задач перспективними є засоби штучного інтелекту — еволюційні алгоритми, нейромережі, машинне навчання тощо.

Ключові слова: модель виробничих процесів, агрегація, декомпозиція, календарний план, керування запасами, проєктування, принцип системної оптимізації.

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.035>

Ya.M. ANTONIUK, Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-7680-5950>
ant@noc.irtc.org.ua

B.A. SHYIAK, Junior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-9130-7370>
bosh@noc.irtc.org.ua

V.H. TKALYA, Senior Researcher, PhD Student,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-7870-3256>
advv0207@gmail.com

S.L. ARKHANHELKA, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave, Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-6889-8294>
dep125@irtc.org.ua

TELEMETRY AS THE FOUNDATION OF PREDICTABLE QOS IN HYBRID CAMPUS NETWORKS

This paper addresses the problem of ensuring predictable Quality of Service (QoS) in hybrid campus networks that integrate wired Ethernet segments and wireless Wi-Fi segments into a unified infrastructure. It is shown that the fundamentally different nature of constrained resources – bandwidth and queueing in the wired environment versus airtime in the wireless medium – precludes the direct application of classical QoS mechanisms without adaptation. The necessity of a systematic end-to-end QoS approach is substantiated, based on policy alignment across heterogeneous segments and the use of telemetry as a means of verifiability and controlled adaptation. Classes of telemetry metrics are proposed that enable the assessment of resource state, access quality, and integral end-to-end quality indicators in

Cite: Antoniuk Ya.M., Shyiak B.A., Tkalya V.H., Arkhanhelska S.L. Telemetry as the Foundation of Predictable QOS in Hybrid Campus Networks. *Information Technologies and Systems*. 1 (7). 2026. 35 – 42. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.035>

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

hybrid campus networks. The role of telemetry as a foundation for building stable QoS policies and for the subsequent application of automation and machine learning methods is demonstrated.

Keywords: *hybrid campus network; Quality of Service; QoS; network telemetry; Wi-Fi; Ethernet; airtime; end-to-end QoS.*

Introduction

Modern campus networks integrate multiple networking technologies – such as the IEEE 802.3 family of standards – into a unified hybrid infrastructure in which the interaction between different transmission media is critically important. The defining characteristics of such networks include user mobility and traffic heterogeneity, which make Quality of Service (QoS) management an inherently end-to-end challenge. In Wi-Fi networks, the primary constrained resource is airtime, which is strongly influenced by radio environment conditions, whereas in wired and optical Ethernet networks the limiting factors are bandwidth and queueing resources.

Consequently, achieving predictable and stable QoS requires coordinated policies, systematic telemetry, and adaptive control mechanisms that enable effective coordination of resources across both segments and ensure service reliability for all traffic classes.

Problem Statement

The objective of the paper is to develop a systematic approach to ensuring predictable Quality of Service in hybrid campus networks that combine wired and wireless segments within a unified infrastructure. The study focuses on analyzing the fundamental differences in the nature of constrained resources in Ethernet and Wi-Fi networks and on identifying the implications of these differences for the organization of end-to-end QoS.

The primary task is to substantiate the role of telemetry as a key instrument for verifiable QoS, enabling a transition from declarative and static policies to controlled adaptation, based on the actual state of the network. Within this scope, the paper also addresses the task of classifying and systematizing telemetry metrics that are informative for assessing Quality of Service in both segments and that can be coherently aligned across the hybrid network.

Hybrid Campus Network: Definition and Key Characteristics

A **hybrid campus network** is a network of a single institution or a group of enterprises, geographically confined, that belongs to a specific branch of the regional provider Internet topology. Such a network integrates wired optical and copper Ethernet segments with wireless Wi-Fi segments into a single service domain with coordinated access, security, and Quality of Service policies. Unlike the traditional model, in which wireless access was treated as an auxiliary component, in a hybrid campus network both

transmission media are considered equal and integral parts of a unified infrastructure.

A key characteristic of a hybrid campus network is **user mobility combined with traffic heterogeneity**. Users and devices can dynamically change their points of attachment and access types while simultaneously consuming services with diverse requirements in terms of latency, bandwidth, and reliability. This transforms Quality of Service provisioning from a set of local configuration tasks into a comprehensive end-to-end system-level challenge.

Hybrid campus networks are typical for **modern universities, health-care institutions, corporate and industrial facilities**, where stationary systems, staff mobile devices and numerous Internet of Things devices coexist. In such environments Wi-Fi is used not only for user access but also to support mission-critical services, which significantly increases the requirements for QoS predictability and stability.

A fundamental distinction between hybrid campus networks and traditional architectures lies in **the different nature of their constituent resources**. In wired Ethernet segments, the primary resources are link bandwidth and service queues, whereas in Wi-Fi the limiting resource is airtime, which is allocated among stations in a competitive manner and is highly dependent on radio-environment conditions. This precludes the direct application of classical QoS mechanisms without appropriate adaptation.

An additional challenge arises from **the nondeterministic nature of wireless access** and the need to align priorities across heterogeneous traffic classification and scheduling mechanisms in Wi-Fi and Ethernet. A priority assigned in the wired portion of the network does not guarantee equivalent service quality in the wireless segment without proper mapping and control.

Therefore, a hybrid campus network must be treated as **a single managed system** in which QoS is shaped along the entire transmission path. This necessitates a systematic QoS approach based on coordinated policies, the use of telemetry and careful consideration of the physical and protocol-level characteristics of different access media.

Primary Approaches to QoS Organization in Wired and Wireless Campus Network Segments

Quality of Service in campus networks is defined as a set of mechanisms for managing constrained resources in order to provide specified performance characteristics for different traffic classes. In hybrid campus networks these mechanisms are implemented simultaneously in wired Ethernet environments and wireless Wi-Fi environments, which differ fundamentally in their physical and protocol-level characteristics.

QoS in the Wired Ethernet Segment. In the wired segment QoS is based on a relatively deterministic channel model in which the primary

constrained resources are **link bandwidth and device buffer memory**. Classical approaches include traffic classification and marking (IEEE 802.1p, DSCP), the use of queues and schedulers, as well as traffic policing and shaping mechanisms. When properly configured, these mechanisms make it possible to achieve reproducible and predictable behavior for critical traffic classes, particularly real-time services.

QoS in the Wireless Wi-Fi Segment. In the wireless Wi-Fi segment, QoS is implemented under conditions of shared use of the radio medium, where the primary scarce resource is **airtime** and medium access is inherently competitive. The IEEE 802.11e standard defines MAC-layer enhancements, in particular the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanism, which is implemented in practice through Wi-Fi Multimedia (WMM) [1]. These mechanisms allow different contention parameters to be assigned to traffic classes but do not provide strict resource guarantees.

The effectiveness of QoS in Wi-Fi is highly dependent on physical-layer factors, including radio environment conditions, modulation rates, the number of retransmissions and client density. Under such conditions, the traditional interpretation of QoS as a bandwidth guarantee is of limited applicability; a more appropriate metric becomes **fairness in airtime allocation**.

Comparison of QoS Approaches in Ethernet and Wi-Fi. The key differences between QoS approaches in wired and wireless segments are summarized in Table 1.

Implications for Hybrid Campus Networks. The comparison demonstrates that QoS in Ethernet and Wi-Fi relies on **fundamentally different resource and contention models**. In a hybrid campus network, this implies that identical traffic marking (e.g., DSCP – Differentiated Services Code Point) does not guarantee equivalent service quality across wired and wireless segments without additional policy alignment. Accordingly, QoS organization must be treated as an end-to-end system-level task that requires consideration of Wi-Fi physical constraints, the use of telemetry and controlled policy adaptation.

Table 1. Differences between QoS approaches in wired and wireless segments

Characteristic	Ethernet	Wi-Fi
Primary constrained resource	Bandwidth, queues	Airtime
Medium access type	Deterministic	Competitive
Main QoS mechanisms	Queues, schedulers, shaping	EDCA / WMM (IEEE 802.11e)
Impact of physical layer	Minimal	Critical
Base fairness metric	Bytes / throughput	Airtime
Predictability	High	Limited
Congestion response	Queuing, packet loss	Collisions, increased latency

At the same time, there is a need for rapid and flexible modification of policies. Software-defined networking (SDN) is well suited to this task [2]. In addition to improved flexibility, software-defined networks may also demonstrate superior latency characteristics [3].

Telemetry as the Foundation of Verifiable QoS in Hybrid Campus Networks

The Role of Telemetry in QoS. In hybrid campus networks, Quality of Service cannot be treated as a set of declarative policies or static configurations. Due to the differing physical nature of wired and wireless segments, as well as the dynamic behavior of Wi-Fi, actual service quality is formed over time and depends on the current state of the network. In this context, **telemetry becomes a necessary prerequisite for verifiable and controllable QoS.**

Telemetry enables the network operator to:

- observe actual resource consumption;
- detect discrepancies between configured policies and real network behavior;
- evaluate the impact of changes to QoS parameters;
- provide a foundation for adaptive control without sacrificing stability.

Without telemetry, QoS remains a local configuration artifact rather than a systemic property of the network.

Principles of Telemetry System Design. When applying telemetry to QoS tasks, not only the metrics themselves are important, but also the principles governing their selection and processing [4]:

- **End-to-end consistency** – metrics must be aligned across Wi-Fi and Ethernet segments.
- **Measurability** – each metric must have a well-defined method of collection and interpretation.
- **Sensitivity to degradation** – metrics should react to quality degradation before it becomes critical.
- **Compatibility with automation** – metrics must be suitable for aggregation and analysis in cloud-based systems.

This approach enables the application of machine learning (ML) techniques for monitoring hybrid campus networks [5].

Classes of QoS Telemetry Metrics. For a systematic analysis of QoS in a hybrid campus network, it is advisable to distinguish several complementary classes of metrics, as summarized in Table 2.

Telemetry Aggregation and Alignment. Individual metrics have limited value without alignment across segments. This is achieved through:

- normalization of indicators;
- aggregation by traffic classes and locations;
- correlation between Wi-Fi and Ethernet metrics.

Of particular importance is the transformation of Wi-Fi metrics (e.g., airtime, retries) into a form suitable for comparison with wired-network indicators.

Table 2. Complementary classes of metrics for systematic QoS analysis

Metric category	Key metrics	Interpretation	Collection methods
Traffic and queues (Ethernet & Wi-Fi)	Average/peak per-class throughput, queue occupancy, packet drops, queueing delay and variation	Reflect congestion and scheduler efficiency; in Wi-Fi, reveal systematic degradation	Switch/AP counters, SNMP, streaming telemetry, hardware queue counters
Airtime and access (Wi-Fi)	Airtime share per class/client, access attempts and retries, average wait time, collisions/backoff	Assess fairness of resource allocation; identify cases where high priority does not yield expected QoS	AP counters, Wi-Fi controller telemetry, vendor-specific streaming APIs
Physical layer (Wi-Fi)	RSSI, SNR, MCS in use, retransmissions, channel width, noise level	Separate physical issues from QoS policies; critical for correct control	AP telemetry, radio monitoring sensors, client driver data
End-to-end delay and quality	End-to-end latency, jitter, packet loss, service reachability	Reflect user-perceived quality; verify achievement of target QoS	Active probing, passive flow analysis, application-layer telemetry
Stability and dynamics	Rate of metric change, oscillation amplitude, duration of degraded states, hysteresis	Distinguish short-term bursts from persistent problems; prevent unstable control	Time-series aggregation, sliding windows, cloud analytics

Limitations of Telemetry. Telemetry has inherent limitations:

- delays in data collection and aggregation;
- incompleteness and vendor-specific implementations;
- limited accuracy of client-side data.

Therefore, telemetry cannot be used for instantaneous control; instead, it should serve as the foundation for **controlled adaptation** and for verifying the effectiveness of QoS policies.

Conclusions

Hybrid campus networks integrate Ethernet and Wi-Fi into a unified system in which user mobility and traffic heterogeneity transform QoS into an inherently end-to-end challenge. The principal difficulties arise from the different nature of constrained resources: Ethernet is limited by bandwidth and queueing resources, whereas Wi-Fi is constrained by airtime and radio-environment conditions. Directly transferring QoS policies between these segments without adaptation does not guarantee equivalent service quality.

Effective QoS provisioning requires coordinated policies, the use of telemetry and adaptive priority control. Telemetry makes it possible to monitor actual resource consumption, identify discrepancies between

configured policies and the real network state, establish a foundation for controlled adaptation. Only a comprehensive system-level approach—based on end-to-end metrics, data aggregation, and alignment between Wi-Fi and Ethernet—can ensure predictable and stable Quality of Service.

The proposed telemetry-based approach enables not only the observation of the current network state but also the verification of target QoS attainment, the detection of latent degradation, and the evaluation of policy effectiveness. The systematization of metric classes provides a practical basis for their implementation in monitoring systems and for subsequent use in automated or intelligent control algorithms.

The results of this study can be applied to the design of hybrid campus networks, the optimization of their operation, the development of solutions based on Software-Defined Networking and cloud-based or on-premises analytics. From a practical perspective, the work lays the groundwork for improving the stability of mission-critical services, reducing the risk of quality degradation, and transitioning toward predictable QoS as a managed property of modern campus networks.

DECLARATIONS

Declaration of Competing Interest. No potential conflict of interest is reported by the authors.

Funding. The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

Use of AI. The authors declare that Artificial intelligence tools were not used in writing the paper.

REFERENCES

1. Mangold S., Choi S., May P., Klein O., Hiertz G., Stibor L. IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service. 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/2922033_IEEE_80211e_wireless_LAN_for_quality_of_service
2. Barba R.G., Criollo M., Aimaçana N., Manosalvas C., Silva-Cardenas C. QoS Policies to Improve Performance in Academic Campus and SDN Networks. *IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Guadalajara, 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2018.861322>
3. Numan P.E., et al. On the latency and jitter evaluation of software defined networks. *Bulletin EEL*, 2019, vol. 8 (4), 1507–1516. <https://doi.org/10.11591/eei.v8i4.1578>
4. Song H., Qin F., Martinez-Julia P., Ciavaglia L., Wang A. Network Telemetry Framework. *Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 9232*, 2022. <https://doi.org/10.17487/RFC9232>
5. Widiawati C. R. A., Sarmini S., Dwi Yu. Predicting Network Performance Degradation in Wireless and Ethernet Connections Using Gradient Boosting, Logistic Regression, and Multi-Layer Perceptron Models. *J. Appl. Data Sci.*, 2024, vol. 6 (1), 325–338. <https://doi.org/10.47738/jads.v6i1.519>

Received 16.02.2026

Accepted 04.03.2026.

Published 30.04.2026

Я.М. АНТОНІЮК, старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-7680-5950>
ant@noc.irtc.org.ua

Б.А. ШИЯК, молодш. наук. співроб.

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0009-0004-9130-7370>

bosh@noc.irtc.org.ua

В.Г. ТКАЛЯ, старш. наук. співроб., аспірант,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0009-0004-7870-3256>,

advv0207@gmail.com

С.Л. АРХАНГЕЛЬСЬКА, наук. співроб.,

Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-6889-8294>

dep125@irtc.org.ua

ТЕЛЕМЕТРИЯ ЯК ОСНОВА ПЕРЕДБАЧУВАНОВОГО QoS У ЗМІШАНИХ КАМПУСНИХ МЕРЕЖАХ

Вступ. Сучасні кампусні мережі інтегрують численні мережеві технології в єдину гібридну інфраструктуру, в якій взаємодія між різними середовищами передачі є критично важливою. Визначальними характеристиками таких мереж є мобільність користувачів та неоднорідність трафіку, що робить управління якістю обслуговування QoS невід'ємною частиною проблеми. У мережах Wi-Fi основним обмеженим ресурсом є ефірний час, на який сильно впливають умови радіосередовища, тоді як у дротових та оптичних мережах Ethernet обмежувальними факторами є ресурси пропускної здатності та черги. Отже, досягнення передбачуваної та стабільної QoS вимагає скоординованих політик, систематичної телеметрії та адаптивних механізмів управління.

Метою цієї статті є розробка системного підходу до забезпечення передбачуваної якості обслуговування в гібридних кампусних мережах, які поєднують дротові та бездротові сегменти в рамках єдиної інфраструктури. Дослідження зосереджено на аналізі фундаментальних відмінностей у характері обмежених ресурсів у мережах Ethernet та Wi-Fi та на визначенні наслідків цих відмінностей для організації наскрізної QoS.

Методи. Запропоновано класи метрик телеметрії, що дозволяють оцінювати стан ресурсів, якість доступу та інтегральні показники end-to-end якості в змішаних кампусних мережах.

Результати. Показано, що різна природа обмежених ресурсів – пропускної здатності та черг у дротовому середовищі й ефірного часу в бездротовому – унеможливує пряме перенесення класичних QoS-механізмів без адаптації. Обґрунтовано необхідність системного наскрізного підходу до QoS, заснованого на узгодженні політик між сегментами та використанні телеметрії як інструмента перевірюваності й контрольованої адаптації. Показано роль телеметрії як основи для побудови стабільних QoS-політик і подальшого застосування методів автоматизації та машинного навчання.

Висновки. Результати цього дослідження можуть бути застосовані для проектування гібридних кампусних мереж, оптимізації їхньої роботи та розробки рішень на основі програмно-визначених мереж та хмарної або локальної аналітики. З практичної точки зору, робота закладає основу для підвищення стабільності критично важливих послуг, зниження ризику погіршення якості та переходу до передбачуваної QoS як керованої властивості сучасних кампусних мереж.

Ключові слова: гібридна кампусна мережа; якість обслуговування; QoS; мережева телеметрія; Wi-Fi; Ethernet; ефірний час; наскрізна QoS.

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.043>
UDC 004:621.391

H.A. ZATULOVSKIY, Master's Student,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Beresteysky ave., Kyiv, 03056, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-1579-5461>
joranosorog@gmail.com

H.A. PIDNEBESNA, PhD (Engineering), Senior Lecturer,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Beresteysky ave., Kyiv, 03056, Ukraine
Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems NAS Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>
pidnebesna@ukr.net

SYSTEM FOR MEDICAL DOCUMENTATION FILLING BASED ON AUTOMATIC RECOGNITION OF AUDIO RECORDINGS

The investigation aims to address the pressing issue of excessive administrative burden on medical personnel in Ukraine, which leads to significant time expenditures and the risk of errors in manual documentation. As a result, an intelligent software system was created that can automatically convert audio recordings of medical consultations into structured reporting adapted to national standards. The developed system is adapted to the linguistic and regulatory environment of Ukraine, ensures an unprecedented level of data confidentiality by localizing the transcription process, and directly generates reports in accordance with national standards.

Keywords: intelligent software system, automatic recognition of audio recordings, medical records administration, automatic speech recognition, generative language models, structured reporting.

Introduction

Medical record management is one of the most pressing and time-consuming challenges in physician practice. Numerous studies point to a disturbing trend: medical professionals are forced to devote a significant

Cite: Zatulovskiy H.A., Pidnebesna H.A. System For Medical Documentation Filling Based on Automatic Recognition of Audio Recordings. *Information Technologies and Systems*. 1 (7). 2026. 43 – 53. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.043>

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

portion of their time to completing electronic records and generating reports, rather than to patient care. This imbalance, where administrative tasks begin to take precedence over clinical interactions, is extremely detrimental. The situation is further complicated by the ever-increasing overall burden on the medical system and the simultaneous tightening of regulatory requirements for the quality, completeness and detail of medical records [1 – 3].

The solution to this problem is the implementation of intelligent systems capable of automating the conversion of physician and patient speech into structured medical records. The combination of automatic speech recognition (ASR) and generative language models (LLM) technologies enables the creation of a tool that enables transcription, extraction of key clinical entities and the completion of standardized forms in real time. This system is a necessary step in the digital transformation of the medical industry.

The purpose of the paper is to improve the efficiency of document flow in medical institutions by developing and implementing an information system for automated processing of audio data from consultations and intelligent completion of medical reports.

Survey of Modern Technologies for Solving the Problem

Automatic Speech Recognition Technologies. Automatic Speech Recognition is a key technology for medical record automation systems. Significant progress has been made in this field in recent years thanks to the development of deep learning and transformative neural network architectures [4]. Several technologies, including OpenAI Whisper [5, 6], Google Cloud Speech-to-Text [7], Vosk [8], and Microsoft Azure Speech Services [9], were reviewed and their advantages and disadvantages were analyzed in detail. Whisper Large v3 Turbo was selected for the system because it provides high accuracy for both Ukrainian and English, operates offline (critical for medical data privacy), and offers an optimal balance between speed and accuracy. Furthermore, the model is open-source, requires no additional training, and is actively supported by the community.

Analysis of Natural Language Processing Methods. After receiving a text transcript from an automatic speech recognition system, the task of structuring the information and identifying key medical entities arises. This task is critical for automatically filling medical forms, as the unstructured text of the doctor-patient dialogue must be converted into specific document fields (patient name, age, diagnosis, complaints, medical history, prescription, etc.) [10].

Various approaches are used to solve this problem, which can be roughly divided into three categories: traditional NER models [11], generative LLM models [12], and rule-based methods [13]. Our system for identifying medical entities and structuring transcript information uses the

Google Gemini API (Gemini 2.0 Flash model). The choice of this model was based on several factors: Gemini demonstrates excellent support for the Ukrainian language and the ability to understand medical context even in colloquial speech. Gemini supports the generation of structured JSON output, which simplifies integration with medical forms. In addition, the model is capable of few-shot learning, meaning it can learn to extract the required fields based on a few examples in the prompt, without the need for large annotated datasets.

Existing Medical Record Automation Systems. The current market offers a significant number of medical record automation solutions, varying in functionality, technology stack, pricing and geographic coverage. The most significant systems, representing different approaches to solving the problem of automating medical record flow, were analyzed: Suki AI [14], Nuance Dragon Medical [15] and DeepScribe [16].

An analysis of existing systems revealed the following key limitations, justifying the need to develop a custom solution. First, none of the leading international systems support the Ukrainian language at a level sufficient for medical applications, making them unsuitable for use in Ukrainian medical institutions without significant modifications. Second, all cloud-based solutions transmit medical data to servers located abroad (primarily in the United States), which creates legal risks and violates confidentiality principles.

These limitations define the basic requirements for the developed system. The system must support the Ukrainian language at a high level, ensure fully local data processing to ensure confidentiality, use open-source components to minimize costs, integrate with Ukrainian medical documentation standards [17] and use modern AI technologies for ambient documentation.

System Architecture

We developed an information system for automated medical form filling. It utilizes a modular architecture that enables seamless expansion of functionality between components and facilitates scalability and customization (Fig. 1). The modular approach eliminates the need for system maintenance, allows for independent component updates without requiring the inclusion of all system functions, accelerates testing and module loading.

The client-side portion of the system is designed for viewing browser extensions for Google Chrome and runs on the Google Meet platform. Manifest V3 is a new specification for Chrome extensions that ensures uninterrupted performance. We chose Manifest V3, the highest standard, which provides advanced capabilities for working with media streams, guarantees data-free access and optimizes system resource utilization.

An alternative ping-pong solution for seamless audio streaming with minimal overhead in a custom, advanced system. This will allow

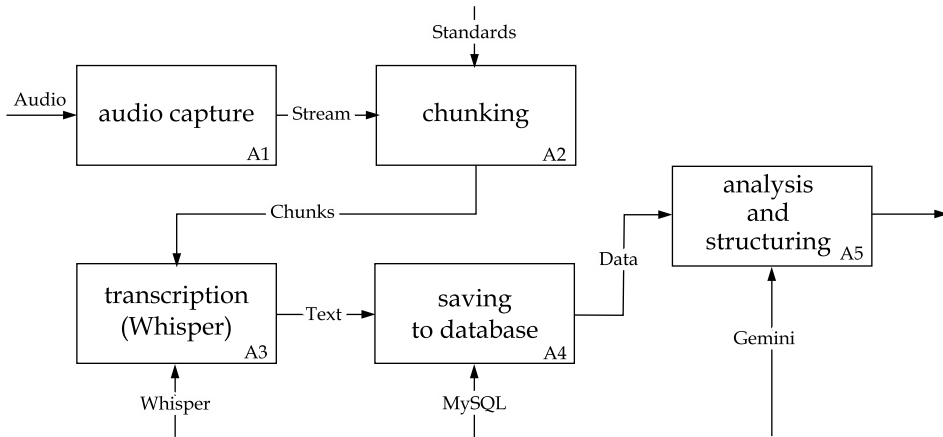


Fig 1. Main processing scheme

you to transition to audio recording with multiple sequential recording fragments.

A modular architecture with a clear separation of individual components improves the system’s reliability and scalability: no single module is required to operate all systems as a whole. This ensures a high level of performance.

The server-side portion of the system is implemented using the FastAPI framework, which handles audio file processing, transcription and storing the results in a database. The server-side architecture is designed using the Facade design pattern, allowing for flexible interactions between subsystems with a unified interface. At this point, the servers are integrated with the client-side partial system, facilitating overlay, testing and further development of functions. The use of Facade API controllers enables the use of high-level methods without the need to develop internal logic for each subsystem’s operations, which reduces the number of components and increases architectural complexity.

One of the key functions of the server-side is the asynchronous processing of audio chunks retrieved from the client system (a Google Meet extension). This asynchronous nature is crucial to avoid the need to process multiple one-hour recording sessions for various operations without blocking the main thread and with minimal latency. Sometimes an audio fragment is processed independently of others, allowing the system to operate in real time, processing multiple streams in parallel without interfering with each other. This function executes an asynchronous function (async def), ensuring efficient use of server resources during large numbers of simultaneous downloads. Oscillators can be recycled to handle other requests at the completion of the process creation/decomposition operation.

Transcription is performed locally for the additional Whisper Large V3 Turbo model (transcriber.py), ensuring the confidentiality of medical data and the immediate availability of additional services. The model is

loaded via the Hugging Face Hub and automatically configures itself upon access to the hardware. This approach provides a balance between speed, accuracy and unavailability.

Intelligent Analysis Using LLM

The Google Gemini API via the `google-genai` library is used to automatically fill medical forms based on transcribed text. Gemini 2.0 Flash was chosen as the optimal choice due to its high request processing speed (up to 2 seconds for a typical medical form), an expanded context window (1 million tokens), which allows processing even very long consultation transcripts, and excellent understanding of medical terminology in Ukrainian. Gemini 2.0 Flash demonstrates good results in structured information extraction and JSON generation, which is critical for accurate form filling.

The form parser is built on the principle of template prompting using Jinja2: for each type of medical form, a separate, detailed prompt template is created, containing a description of the form structure, examples of correct completion, validation rules and instructions for handling cases where certain information is missing from the transcript. The use of a low temperature (0.1) ensures deterministic and predictable model behavior, minimizing hallucinations and ensuring stability of results between runs. After receiving data from the Gemini API, the system undergoes a critical validation and normalization step to ensure form completion is accurate and complies with medical standards. The validator performs a comprehensive check of the received data against several criteria: it verifies the presence of all required fields defined in the form configuration, controls the format of special fields such as phone numbers (mask +380XXXXXXXXX), dates (DD.MM.PPRR format), registration card numbers and checks "select" fields against acceptable dictionary options to prevent the entry of incorrect or non-standardized values. If inconsistencies are detected, the system automatically normalizes the data to a standard format: it adds country codes to phone numbers, standardizes dates and removes extra spaces and special characters from text fields.

To ensure seamless audio stream capture during medical consultations, a specialized Chrome browser extension was developed that integrates with the Google Meet platform and provides the ability to automatically record dialogues. The extension's architecture is built around a clear separation of responsibilities between components, with each module performing its own specific function: a service worker (`background.js`) coordinates the overall operation of the extension and manages its lifecycle, while an offscreen document captures and processes audio streams using the Web Audio API and displays transcripts in real time. This architecture fully complies with Manifest V3, the latest version of the Chrome Extensions specification, and ensures stable operation even during long

recording sessions, which is critical for medical consultations, which often last from 30 minutes to an hour or more.

The extension's interface integrates directly into the Google Meet page as a floating panel located in the lower left corner of the screen. It provides convenient access to controls without obscuring the main video conference area displaying participants.

To ensure convenient and efficient work for medical staff with accumulated consultation transcripts and the automatic filling of various medical forms, an intuitive web application was developed based on the modern Streamlit framework, combining ease of use with powerful data processing functionality. The system's interface is logically structured and consists of two main operating modes, which the user can easily switch between: viewing and editing existing transcripts with the ability to add doctor voice notes, and automatically filling out medical forms based on intelligent analysis of transcribed consultations using the capabilities of large language models.

The system's main interface page is designed with an emphasis on functionality and ease of use. The interface includes (Fig. 2) a side navigation bar with intuitive mode selection controls and powerful record filtering tools for quickly finding the desired consultations among the large amount of stored data. The central part of the screen displays the main data table loaded from a MySQL database, where each row represents an individual medical consultation with basic metadata: an abbreviated record identifier, patient and doctor names, a short transcript fragment for preview and the date of the consultation. This table is interactive and allows the user to quickly browse available records, sort them by various criteria and select a specific record for detailed viewing or editing with one click.

The ability for the physician to record additional information (medication prescriptions, diagnosis, symptoms, etc.) is also implemented.

After the transcription process is complete, which typically takes only a few seconds thanks to the optimized turbo version of the Whisper model, the system automatically displays the recognized text in a dedicated text field below the audio recording module. This allows the physician to immediately check the recognition quality, ensure that all important information was correctly recognized and edit the text, if necessary, before saving.

The automatic analysis mode for consultation transcripts is the most innovative and technologically sophisticated feature of the entire medical information system, providing intelligent processing of unstructured dialogue texts and automatic filling of various types of medical forms with minimal user intervention. The automatic analysis subsystem is built on a modern modular architecture with a clear separation of responsibilities between components and utilizing object-oriented design principles. The general diagram of the interaction of the subsystem components shows the form selection interface, the configuration loading module, the Gemini

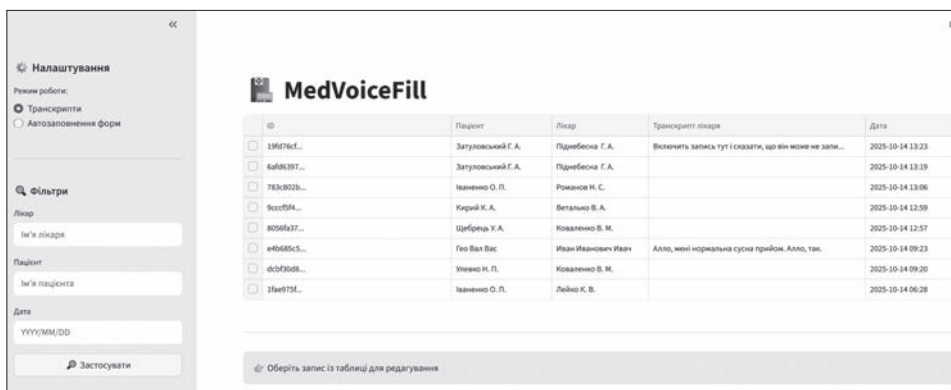


Fig 2. Main interface page with transcript mode

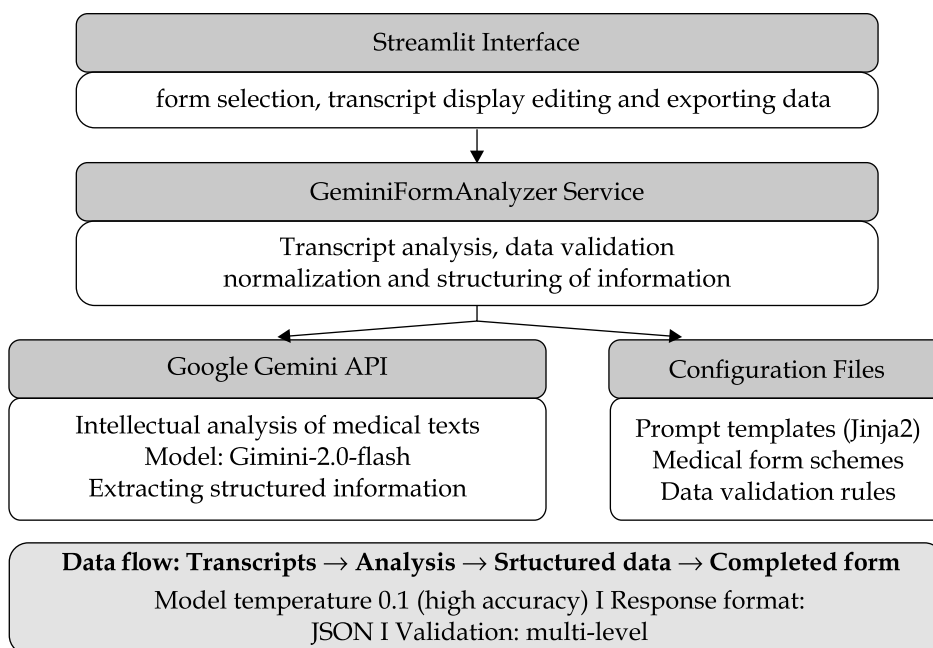


Fig 3. Architecture of the automatic analysis subsystem

API client for text analysis, the validator of the received data, and the generator of source documents in DOCX and JSON formats (Fig. 3).

An example of a module for selecting a medical form is shown on Figure 4.

An example of a generated document in DOCX format with fully populated medical form fields, including all mandatory and optional sections according to the standards of the Ministry of Health of Ukraine [18] (Fig. 5).

The JSON file format is created simultaneously with DOCX and contains identical data, but is presented in a machine-readable format with a clear hierarchical structure, where each form field has a corresponding key and a typed value. It is particularly useful for automated integration

Form selection

Choose a form:

(025/o) – Outpatient medical record ▼

(025/o) – Outpatient medical record

(003/o) – Inpatient medical record

(027/o) – Medical record extract

(063/o) – Prophylactic vaccination map

(086/o) – Medical certificate for subm

Fig. 4. Example of a module for selecting a medical form

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства охорони здоров'я України
14 лютого 2012 року № 110

Найменування міністерства, іншого органу виконавчої влади, підприємства, установи, організації, до сфери управління якого належить заклад охорони здоров'я Найменування та місцезнаходження (повна поштова адреса) закладу охорони здоров'я, де заповнюється форма Код за ЄДРПОУ	МЕДИЧНА ДОКУМЕНТАЦІЯ Форма первинної амбулаторної документації № 025/о ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ МОЗ України №
МЕДИЧНА КАРТА АМБУЛАТОРНОГО ХВОРОГО №	
Код хворого _____ Дата заповнення карти [1 6 1 0 2 5] <small>(число, місяць, рік)</small>	
1. Прізвище, ім'я, по батькові <u>Олександр Іванович Петрович</u> 2. Стать: чоловіча – 1, жіноча – 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3. Дата народження [1 2 0 3 8 5] 4. Телефон: дом. _____ робочий – 385671234567 <small>(число, місяць, рік)</small> 5. Місце проживання хворого <u>місто Київ, вулиця Лева Українця, будинок 12, квартира 45</u> 6. Місце роботи, посада <u>"БудТехСервіс", інженер-будівельник</u>	
7. Диспансерна група (так – 1, ні – 2) <input type="checkbox"/> 8. Контигент: інвалди війни – 1; учасники війни – 2; учасники бойових дій – 3; інвалди – 4; учасники ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС – 5; евакуйовані – 6; особи, які проживають на території зони радіоекологічного контролю; – 7; діти, які народились від батьків, які віднесені до 1, 2, 3 категорій осіб, що постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи, із зони відчуження, а також віднесені із зони безумовного (обов'язкового) і гарантованого добровільного відселення – 8; інші пільгові категорії – 9 <input checked="" type="checkbox"/>	
9. Номер пільгового посвідчення [A B 1 2 3 4] 10. Взятий(а) на облік [1 6 1 0 2 5] з приводу _____ 11. Знятий(а) з обліку _____ <small>(число, місяць, рік)</small> <small>(число, місяць, рік)</small> <small>(причина)</small> _____ з приводу _____ <small>(число, місяць, рік)</small> <small>(число, місяць, рік)</small> <small>(причина)</small>	

Продовження форми № 025/о

I. СИГНАЛЬНІ ПОЗНАЧКИ	
Група крові <u>II</u>	Резус-фактор <u>позитивний</u>
Перебігання крові (коли, скільки) <u>ніколи</u>	
Цукровий діабет <u>німає</u>	
Інфекційні захворювання <u>втривала</u>	
Хірургічні втручання <u>апендектомія у 2010 році</u>	
_____ _____ _____	
Алергологічний анамнез <u>на пилок, берези</u>	
Непереносимість лікарських препаратів (негативні побічні дії лікарських засобів) <u>принципальні</u>	
Фактори ризику _____ (жовтий, вищо)	
Лікуючий лікар _____ (прізвище, підпис)	

Fig. 5. Example of saving in DOCX format

with electronic medical records, electronic document management systems of medical institutions, regional and national patient databases, and for transferring data to the Unified Healthcare System (EHS) via standardized APIs without the need for manual data transfer.

Conclusions

This study aims to address the pressing issue of excessive administrative burden on medical personnel in Ukraine, which leads to significant time expenditures and the risk of errors in manual documentation. The main goal was to create an intelligent software system capable of automatically converting audio recordings of medical consultations into structured reporting adapted to national standards.

This goal was achieved through the development of a modular architecture combining a browser-based client and a high-performance server processor. A key technical feature is the implementation of a confidential and continuous audio stream capture mechanism thanks to a unique “ping-pong” architecture. High-precision transcription of Ukrainian medical terminology is ensured through the use of a locally deployed Whisper Large v3 Turbo model, a fundamental advantage over cloud-based foreign counterparts and guaranteeing complete confidentiality of patient data.

An important functional module of the system is the implementation of semantic analysis, which integrates the generative capabilities of the Gemini API with dynamic Jinja2 templates. This enables reliable extraction of key entities (diagnosis, complaints, anamnesis) from the transcript and the automatic generation of validated documents in DOCX format for official use, as well as JSON. Computational experiments fully confirmed both the high quality of recognition and the successful fulfillment of all requirements defined in the technical specifications. The developed system has clear competitive advantages: it is adapted to the linguistic and regulatory environment of Ukraine, ensures an unprecedented level of data confidentiality by localizing the transcription process and directly generates reports in accordance with national standards.

DECLARATION

Declaration of Competing Interest. *No potential conflict of interest is reported by the authors.*

Funding. *The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.*

Use of AI. *The authors declare that Artificial intelligence tools were not used in writing the paper.*

Contribution of the authors. *Zatulovskyi H.A. is responsible for the software implementation, preparation of drawings, diagrams, and their description. Pidnebesna H.A. is responsible for the main idea of the article and its methodological part.*

REFERENCES

1. Arndt B.G., Beasley J.W., Watkinson M.D., et al. Tethered to the EHR: Primary Care Physician Workload Assessment Using EHR Event Log Data and Time-Mo-

- tion Observations. *Annals of Family Medicine*, 2017, Vol. 15 (5), 419–426. <https://doi.org/10.1370/afm.2121>
2. Mamykina L., Vawdrey D.K., Hripcsak G. How Do Residents Spend Their Shift Time? A Time and Motion Study With a Particular Focus on the Use of Computers. *Academic Medicine*, 2016, Vol. 91 (6), 827–832. <https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000001148>
 3. Shanafelt T.D., West C.P., Sinsky C., et al. Changes in Burnout and Satisfaction With Work-Life Integration in Physicians and the General US Working Population Between 2011 and 2020. *Mayo Clinic Proceedings*, 2022, Vol. 97 (3), 491–506. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2021.11.021>
 4. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, Vol. 521, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
 5. Radford A., Kim J. W., Xu T., et al. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision. *arXiv*, 2022, Article 2212.04356. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>
 6. OpenAI Whisper Model Card. URL: <https://github.com/openai/whisper/blob/main/model-card.md> [Accessed 07 Nov. 2025]
 7. Google Cloud Speech-to-Text Documentation. URL: <https://cloud.google.com/speech-to-text/docs> [Accessed 07 Nov. 2025]
 8. Vosk Offline Speech Recognition API. URL: <https://alphacephei.com/vosk/> [Accessed 07 Nov. 2025]
 9. Microsoft Azure Speech Services Documentation. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/ai-foundry/tools/speech/> [Accessed 07 Nov. 2025]
 10. Jensen P. B., Jensen L. J., Brunak S. Mining electronic health records... *Nature Reviews Genetics*, 2012, Vol. 13, 395–405. <https://doi.org/10.1038/nrg3208>
 11. Yadav V., Bethard S. A Survey on Recent Advances in Named Entity Recognition... *The 27th International Conference on Computational Linguistics, COLING*, 2018, 2145–2158.
 12. Touvron H., Lavril T., Izacard G., et al. LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models. *ArXiv*, 2023, Article 2302.13971.
 13. International Statistical Classification of Diseases... ICD-10, WHO, 2019. URL: <https://icd.who.int/> [Accessed 14 Nov. 2025]
 14. Suki AI Platform Overview. URL: <https://www.suki.ai/> [Accessed 15 Nov. 2025]
 15. Nuance Dragon Medical One Documentation. <https://dragon.nuance.com/en-us/user-documentation> [Accessed 16 Nov. 2025]
 16. DeepScribe: Ambient AI Scribe for Healthcare. URL: <https://www.deepscribe.ai/> [Accessed 16 Nov. 2025]
 17. Electronic health care system in Ukraine. URL: <https://ehealth.gov.ua/> [Accessed 16 Nov. 2025]
 18. Order Of The Ministry Of Health Of Ukraine 14 Feb. 2012 No. 110 On approval of forms of primary accounting documentation and Instructions for their completion, used in healthcare institutions regardless of the form of ownership and subordination. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0661-12> [Accessed 16 Nov. 2025]

Received 13.11.2025

Accepted 25.03.2026.

Published 30.04.2026

Г.А. ЗАТУЛОВСЬКИЙ, магістрант,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-1579-5461>
joranosorog@gmail.com

Г.А. ПІДНЕБЕСНА, канд. техн. наук, старш. викладач,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна;
старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5735-9861>
pidnebesna@ukr.net

СИСТЕМА ЗАПОВНЕННЯ МЕДИЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ОСНОВІ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ АУДІОЗАПИСІВ

Вступ. Адміністрування медичної документації є однією з найбільш гострих та часозатратних проблем у щоденній практиці лікаря. Численні дослідження вказують на тривожну тенденцію: медичні фахівці змушені приділяти значну частку свого робочого часу не пацієнту, а саме заповненню електронних карток та формуванню звітності. Такий дисбаланс, де адміністративні завдання починають переважати над клінічною взаємодією, є вкрай негативним. Ситуація додатково ускладнюється через невпинне зростання загального навантаження на медичну систему та одночасне посилення регуляторних вимог до якості, повноти та деталізації медичних записів. Вирішенням цієї проблеми є запровадження інтелектуальних систем, здатних автоматизувати перетворення усного мовлення лікаря та пацієнта в структуровані медичні записи. Поєднання технологій автоматичного розпізнавання мовлення та генеративних мовних моделей дозволяє створити інструмент, який забезпечує транскрибацію, витяг ключових клінічних сутностей та заповнення стандартизованих форм у реальному часі. Така система є необхідним кроком для цифрової трансформації медичної галузі.

Метою статті є описати проблему і запропонувати рішення проблеми створення інтелектуальної програмної системи, здатної автоматично перетворювати аудіозаписи лікарських консультацій на структуровану звітність, адаптовану до національних стандартів, що підвищить ефективність документообігу в медичних закладах шляхом розробки та впровадження інформаційної системи для автоматизованої обробки аудіоданих консультацій та інтелектуального заповнення медичної звітності.

Методи. В роботі поєднано технології автоматичного розпізнавання мовлення (ASR) та генеративні мовні моделі (LLM), що дозволяє створити інструмент, що забезпечує транскрибацію, витяг ключових клінічних сутностей та заповнення стандартизованих форм у реальному часі. Така система є необхідним кроком для цифрової трансформації медичної галузі.

Результати. Розроблено модульну архітектуру, яка поєднує клієнтську частину на базі браузерного розширення та високопродуктивний серверний обробник. Ключовою технічною особливістю є реалізація механізму конфіденційного та безперервного захоплення аудіопотоку завдяки унікальній *ping-pong* архітектурі. Забезпечено високоточну транскрибацію української медичної термінології через використання локально розгорнутої моделі *Whisper Large v3 Turbo*, що є фундаментальною перевагою над хмарними іноземними аналогами та гарантує повну конфіденційність даних пацієнтів.

Висновок. Розроблена система має чіткі конкурентні переваги: вона є адаптованою до мовного та нормативного середовища України, забезпечує безпрецедентний рівень конфіденційності даних завдяки локалізації процесу транскрибації та прямо генерує звіти за національними стандартами.

Ключові слова: інтелектуальна програмна система, автоматичне розпізнавання аудіозаписів, адміністрування медичної документації, автоматичне розпізнавання мовлення, генеративні мовні моделі, структурована звітність.

EVOLUTION OF SCIENTIFIC RESEARCH ЕВОЛЮЦІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.054>
УДК 004.9

О.П. ЛАПА, старш. наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-3680-1421>
dep170@irtc.org.ua

Н.Є. ПАВЛЕНКО, наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-5660-8669>
pavnata1949@gmail.com

Н.К. ТИМОФІЄВА, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., зав. відділом,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0312-1153>
tymnad@gmail.com

С.А. ШЕВЧЕНКО, наук. співроб.,
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України,
просп. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-2096-3648>
shvesta@ukr.net

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАУЦІ ТА ВИРОБНИЦТВІ

Описано становлення відділу комплексних досліджень інформаційних технологій починаючи з 1968 р. по сучасний період. Організатором і завідувачем його був член-кореспондент НАН України Гриценко Володимир Ілліч. Під його керівництвом започатковано дуже важливі напрями інформаційних технологій та їх вплив у сферах, пов'язаних з розвитком систем керування залізничним транспортом гірничо-металургійних підприємств, медицини, георозподілених динамічних систем, з розвитком теорії штучного інтелекту та семантичного моделювання, комбінаторної оптимізації, інформаційних технологій в системі освіти. Колектив відділу отримав суттєві

Цитування: Лапа О.П., Павленко Н.Є., Тимофієва Н.К., Шевченко С.А. Інформаційні технології в науці та виробництві. *Information Technologies and Systems*. 1 (7). 2026. 54 – 77. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2026.01.054>
© Publisher РН “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2026. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

наукові результати, підтверджені публікаціями у центральних журналах, монографіями, патентами на винаходи, авторськими свідоцтвами на твір тощо.

Ключові слова: інформаційні технології, комбінаторна оптимізація, керування залізничним транспортом, штучний інтелект, прогнозування життєздатності людини.

Вступ

Описано становлення відділу починаючи з 1968 р. і дотепер. Організатором і завідувачем його був кандидат технічних наук, далі — член-кореспондент НАН України Гриценко Володимир Ілліч. Під його керівництвом започатковано дуже важливі основи розвитку та становлення інформаційних технологій в сферах систем керування, зокрема залізничним транспортом підприємств металургійної промисловості, розвитком теорії штучного інтелекту, онтології, комбінаторної оптимізації, моделі фізіологічних процесів та реакцій людини за різних умов середовища, інформаційних технологій в освітньому процесі тощо. Співробітники відділу отримали суттєві наукові результати, підтверджені публікаціями в наукових журналах, монографіями, патентами на винаходи, авторськими свідоцтвами на твір [1 — 83].

Постановка задачі

Розглянуто становлення та розвиток інформаційних технологій протягом п'ятдесяти років, починаючи з 1968 року і дотепер. За цей період проводилися наукові дослідження в різних галузях, які об'єднані одним науковим напрямом. Це — інформаційні технології.

Підхід, що пропонується

На прикладі прикладних проблем з різних галузей показано розвиток та становлення теорії та практики інформаційних технологій та їх застосування в різних сферах науки та виробництва.

Історична довідка

Відділ комплексних досліджень інформаційних технологій розпочав свою історію наприкінці 1968 р. створенням лабораторії синтезу спеціалізованих цифрових систем керування на базі відділу, який очолював кандидат технічних наук Бернардо дел Ріо, що працював над створенням систем керування залізничним транспортом. Новостворену лабораторію очолив В.І. Гриценко. Ця лабораторія була підрозділом відділення «Теоретичної кібернетики» Інституту кібернетики, який очолював Глушков В.М. З 1995 р. — відділ, а з 1997 р. відділ комплексних досліджень інформаційних технологій МННЦ ІТтаС НАНУ та МОНУ. З 2022 р. завідувачем відділу стала д-р техн. наук, старш. наук. співроб., провідн. наук. співроб. Тимофієва Н.К.

Бібліографічна довідка. Володимир Ілліч Гриценко засновник та організатор створення архітектури систем керування та методів



Володимир Ілліч спілкується з колегами

оптимізації транспортно-технологічними процесами. Закінчив факультет експлуатації залізничного транспорту Ростовського-на-Дону інституту інженерів залізничного транспорту в 1960 р. В тому ж році був направлений в Обчислювальний центр Академії наук УРСР на посаду молодшого наукового співробітника у відділ, яким керував канд. техн. наук Бернардо дел Ріо. В 1962 р. на базі обчислювального центру було створено Інститут кібернетики АН УРСР. З 1962 по 1965 р. працював в ІК АН УРСР старшим інженером, з 1965 по 1968 р. — там же провідним інженером, з 1968 по 1969 р. головним конструктором. В 1968 р. захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. З 1969 по 1977 р. був вченим секретарем Інституту кібернетики АН УРСР. З 1977 по 1995 р. — заступник директора з наукової роботи Інституту кібернетики АН УРСР. Одночасно очолював лабораторію синтезу спеціалізованих цифрових систем управління. З 1992 р. — директор відділення інформаційних технологій та систем ІК ім. В.М. Глушкова АН України з продовженням виконання обов'язків заступника директора з наукової роботи. З 1997 р. — директор Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України та за сумісництвом у відділі комплексних досліджень інформаційних технологій — провідний науковий співробітник. З 2015 р. — член-кореспондент НАН України. Він є засновником наукового напрямку, становлення та реалізації теоретичних основ інформаційних технологій.

Науковий доробок відділу

Інформаційні технології — це сукупність методів, виробничих процесів та програмно-технічних засобів, об'єднаних у технологічний ланцюжок для збирання, зберігання, обробки, пошуку, передачі та поширення інформації. Створення, обробка, зберігання, захист та передача даних потребують застосування комп'ютерної техніки, мережевої інфраструктури, програмного забезпечення (операційних систем, баз даних тощо). Все це повинно забезпечувати швидкий



Гриценко Володимир Ілліч, Мірошніченко Віктор Михайлович, Лапа Олексій Петрович, Богемський Віктор Олександрович

пошук, доступ до джерел інформації та автоматизацію процесів управління, проектування.

У відділі комплексних досліджень інформаційних технологій започатковано та розвинуто дуже важливі напрями теорії та впровадження інформаційних технологій, пов'язаних зі сферами керування залізничним транспортом підприємств металургійної промисловості, георозподіленими динамічними системами, з розвитком теорії штучного інтелекту, онтологічного аналізу, комбінаторної оптимізації, фізіології та медицини, інформаційними технологіями в процесі неперервної освіти. Розглянемо деякі з них.

Системи керування транспортними процесами підприємств металургійної промисловості. В лабораторії синтезу спеціалізованих цифрових систем керування розроблено загальні підходи та принципи побудови автоматизованих систем керування залізничним транспортом металургійних підприємств. У 1970 – 1974 роках під керівництвом В.І. Гриценка у відповідь на постанову № 297 від 16.10.1969 р. Президії АН УРСР співробітники лабораторії розробили типовий проект автоматизованої системи керування транспортом підприємств гірничої та металургійної промисловості [1 – 12].

Було створено методичку побудови автоматизованої системи керування та запропоновано типові рішення з обробки даних, загальну структуру системи, склад задач, режими роботи, визначено типи обладнання для передачі та збору інформації, розроблено алгоритми і програми. Враховувалася підготовка персоналу підприємства, наявність необхідних засобів оргзв'язку та обчислювальних потужностей. Впровадження системи передбачало можливість збору та передачі інформації про транспортний процес, виконання її обробки, формування звітної документації для вирішення завдань обліку

та аналізу вагонопотоків на території гірничих та металургійних підприємств, забезпечення зниження величини простоювань рухомого складу і організацію планування його ефективного використання на заводських коліях. Процес створення проекту супроводжувався співпрацею лабораторії з Міністерством чорної металургії України, ПАО МЧМ УРСР, Українським державним проєктним інститутом «Металургавтоматика», Дніпропетровським інститутом інженерів залізничного транспорту. Беручи до уваги особливу роль транспорту в технології металургійного виробництва, систему розглядали, як складову частину у комплексній автоматизації диспетчерського керування основними технологічними процесами. Співробітники лабораторії розробили інформаційну систему ІНТРАНС-2 – автоматизовану систему обліку, простоювання, стану і роботи вагонного парку МШС на під'їзних шляхах металургійного заводу на базі ЕОМ Мінськ-22. Протягом 1976–1980 років коло завдань поступово розширювалося, виникла необхідність розвитку функцій системи. Розвиток системи передбачав використання потужніших засобів передачі даних, мов програмування і сучасніших засобів обчислювальної техніки, а саме: ЕОМ Мінськ-22, ЕОМ Мінськ-32, ЄС ЕОМ, СМ ЕОМ. Пізніше було розроблено інформаційну систему ІНТРАНС-6 – автоматизовану систему обліку обороту вагонів МШС на металургійному заводі Запоріжсталь за елементами обороту, періодами доби, родами вантажу і цехами завантаження/розвантаження. Створення співробітниками лабораторії подібного класу систем (ІНТРАНС-2, ІНТРАНС-4, ІНТРАНС-6) та отримання досвіду та результатів їхньої експлуатації у виробничих умовах різних підприємств, зокрема на Запоріжсталі, Азовсталі та Новолипецькому металургійних комбінатах підтвердили їх життєздатність. Труднощі впровадження системи були пов'язані з відсутністю досвіду експлуатації подібних систем, необхідністю наявності на заводах засобів забезпечення безперебійної передачі інформації, недостатнім ступенем підготовки персоналу. У 1978 р. модулі системи для виконання попередньої обробки інформації та слідкування за дислокацією транспортних об'єктів у реальному часі були адаптовані та передані у дослідно-промислому експлуатацію Головному інформаційно-обчислювальному центру Головного управління річкового флоту (транспорт річкового флоту).

Автоматизовані системи керування в промисловості. Для вирішення проблем керування промисловим транспортом Міністерство чорної металургії України вимагало комплексних досліджень та впровадження розроблених систем і на рівні окремих підприємств, і на рівні всієї галузі. У 1979 р. було затверджено Програму робіт із створення інтегрованих автоматизованих систем керування у чорній металургії УРСР. Науковим керівником Програми було призначено академіка В.М. Глушкова.

На рівні галузі було поставлено завдання оперативного керування роботою транспорту, організації слідкування за вантажними

операціями і пересуваннями транспортних засобів, планування обсягів перевезень, обсягів ремонтів залізничних колій та рухомого складу, фінансування витрат на ремонт, паливо та мастильні матеріали. Програма передбачала дослідження і розробку інтегрованих моделей керування транспортом на рівні галузі шляхом забезпечення інформаційної і програмної сумісності та взаємодії систем різного рівня, а також створення і введення в експлуатацію на базових підприємствах дослідних зразків автоматизованих систем керування. Враховуючи те, що лабораторією синтезу спеціалізованих цифрових систем керування уже було впроваджено ряд важливих науково-дослідних робіт, спрямованих на створення ефективних програмно-технічних комплексів на рівні підприємства, а також виконано дослідження методів забезпечення взаємодії локальних транспортних систем, її співробітники були залучені до розроблення автоматизованих систем керування, які увійшли до складу підсистеми «Транспорт» галузевої АСУ Укрчормет. Наукове керівництво розробленням підсистеми було доручено Гриценку В.І. В 1979 р. в межах комплексної програми створення інтегрованих систем керування на підприємствах чорної металургії УРСР було розроблено інформаційну систему ІНТРАНС-2Р оперативного керування роботою транспорту підприємств Мінчормету УРСР, яка використовувала механізми синтаксичного та семантичного контролю і захисту даних, містила додаткові функції обчислення та коригування планових завдань для основних показників транспортного процесу, давала змогу виконувати діалоговий режим інформаційно-пошукових задач, використовувала можливість мультипрограмного режиму функціонування, мала можливість тиражування та прив'язки до конкретних умов об'єкта впровадження тощо. Реалізація обміну інформацією між системами типу ІНТРАНС та підсистемою «Транспорт» забезпечила Мінчормет оперативною інформацією про роботу транспорту на його підприємствах та дала змогу підвищити якість оперативного регулювання роботою галузі та покращити показники використання вагонного парку, удосконалити керування експлуатацією транспорту, знизити собівартість перевезень. Для виконання завдань обліку, контролю та аналізу пересувань транспортних засобів у Програмі робіт зі створення інтегрованих автоматизованих систем керування у чорній металургії УРСР було заплановано створення локального банку даних для опе-



Академік Глушков В. М., професор Гриценко В. І.



Директор МННЦПІС Грищенко В.І., президент України Кучма Л. Д. Вручення державної нагороди

ративного керування транспортом галузі. У 1979–1986 роках співробітники лабораторії розробили програмний комплекс для ведення банку даних підсистеми «Транспорт» ГАСУ Укрчормету УРСР. Було проведено дослідження з організації автоматизованого банку даних з технічного оснащення залізничного транспорту галузі на базі автоматизованого оброблення інформації паспортів залізничних господарств підприємств Укрчормету. Було досліджено питання організації та ведення інтегрованої бази даних паспортів залізничних господарств підприємств, вирішено завдання визначення показників роботи і аналізу використання транспортних засобів з метою розроблення планів та засобів з покращення роботи залізничного транспорту та вдосконалення його технічного оснащення, розроблено алгоритми створення загальних звітів показників роботи транспортних підприємств. Підвищення ефективності керування досягалося завдяки використанню інтелектуалізованої інформаційної технології на основі комплексного використання систем баз даних і знань, включно з методами моделювання, оптимізації та роботи з базою даних. Реалізацію програмного комплексу було здійснено з використанням розробленої в Інституті кібернетики СУБД «Пальма» та ЄС ЕОМ.

Інші наукові напрями відділу. Поява персональних комп'ютерів, розвиток засобів передачі інформації, збільшення швидкості передачі даних і методів організації збереження та оброблення даних створили можливість вирішення нових завдань у предметних галузях, які відповідають різним галузям наукової діяльності та соціальної практики, а саме зосереджених на методах комплексних досліджень взаємодії інформаційних технологій та систем, методах та моделях комбінаторної оптимізації в інтелектуальних системах, методах, моделях та технологіях зберігання, оброблення даних та обчислень, інтелектуальних інформаційних технологіях на основі теорії онтологічного аналізу, методів формалізації знань в прикладних

інформаційних системах та технологіях, охороні здоров'я людини та неперервній освіті тощо.

Протягом 1992–1998 років співробітники відділу розробили спеціалізовані інформаційні технології та відповідне програмне забезпечення для бази даних «Єдиної державної автоматизованої паспортної системи України» з використанням СУБД *CLIPPER* та *IBM PC* [1, 11].

Було досліджено методи інтеграції структурованих і слабоструктурованих даних в базах даних розподілених інформаційних систем, що дало змогу побудувати Державну навігаційно-гідрографічну інформаційну систему. Принципи побудови розподілених баз даних та використання технології клієнт-сервер було реалізовано в процесі створення національної автоматизованої комп'ютерної системи збору, передачі, збереження та аналізу океанологічної інформації [14].

Розроблено методи відображення динаміки рухомого складу для регіональних транспортних систем, структура даних та принципи маніпулювання ними [11]. На цій основі створено програмний комплекс моніторингу рухомого складу на розгалужених транспортних мережах. Узагальнено та розвинуто метод умовних величин для моделювання рухомого складу на розгалужених залізничних мережах та створено відповідний програмний комплекс для його реалізації.

Розроблено концепцію інформаційної технології моделювання пасажиропотоків у великих пересадочних вузлах і пасажирських комплексах (АРМ-ДинПас) та відповідну імовірно-автоматну модель динаміки переміщення і взаємодії системи елементарних потоків за умов обмеженого (фізичного) простору об'єкта та взаємодії системи [5].

В 1999–2001 роках за договором з Укрзалізницею та у співпраці з Дніпропетровським Університетом залізничного транспорту було розроблено систему для проведення аналізу планування та прогнозування ремонту вагонів з урахуванням міжремонтних періодів та пробігу, яку було впроваджено у Київському вагонному депо. В 2002–2009 роках в межах проекту паспортизації вагонних депо Укрзалізниці співробітники відділу розробили програмний комплекс для ведення БД «Основні засоби лінійних підприємств Укрзалізниці». А в 2010–2014 роках традиційні операції роботи з БД було інтегровано з можливостями візуалізації та просторового аналізу геоінформаційних технологій, які давали змогу використовувати засоби інтеграції різних об'єктів керування за допомоги цифрової моделі, що спирається на векторні та растрові дані. Досягнуті результати було орієнтовано на впровадження в системах керування перевезеннями, а також для моніторингу об'єктів в системах керування різного призначення та їх розвитку і модернізації. Було розроблено пілотний проєкт Геоінформаційної системи Укрзалізниці, що мав багаторівневу ієрархічну структуру, яка містить можливості відображення об'єктів предметної галузі Укрзалізниці від рівня «Укрзалізниця» до конкретного екземпляру обладнання підрозділу або цеху. Було роз-

роблено архітектуру ієрархії об'єктів предметної галузі Укрзалізниці, структуру ГеоБД предметної галузі Укрзалізниці, технологію оцифрування та просторової прив'язки об'єкта предметної області, технологію одержання нових просторових даних на основі просторового аналізу існуючих даних та граничних умов, заданих в фактографічній БД, методи пошуку, навігації та візуалізації об'єктів як у фактографічній БД, так і в ГеоБД. Для об'єктів предметної галузі Укрзалізниці було визначено оптимальний набір тематичних шарів з метою ефективного пошуку та відображення просторових даних [1, 11].

Одним із напрямів наукових досліджень відділу після виконання міжнародного проєкту *EXPERNET*, який виконував консорціум із п'яти країн Європи, став онтологічний аналіз, створення «Експертної системи для керування національною телекомунікаційною мережею України з доступом до Інтернет». Керівником роботи від України був академік Скуріхін Володимир Ілліч. Ця робота започаткувала розвиток таких напрямів інтелектуального середовища, як бази знань, програмні мультиагентні системи, і вже після 2000 р. після розроблення світовою науковою спільнотою концепції семантичного вебу – напряму онтологічного аналізу. Онтологічний аналіз є складовою компонентою технології штучного інтелекту, що активно розвивається зараз [12].

Розроблено модель системи керування гетерогенною мережею, сформульовано задачі оптимізації ресурсів складної динамічної розподіленої системи між користувачами та сервісами; ієрархічну модель системи керування з відновлювальними функціями підсистем мережі та персоналу для ліквідації нештатних ситуацій та відновлення необхідних значень параметрів; семантичну базу даних (онтологію *OntoManagen*), яка формалізує та накопичує знання про процеси функціонування широкосмугової мобільної мережі на основі подання метаданих необхідного формату, термінів, логічних відношень та інтерпретації термінів. Для інтелектуальних інформаційних систем та мереж розроблено моделі, алгоритми та методи семантично-орієнтованих технологій, спрямованих на подання та оброблення даних і знань, що дозволяє підвищити ефективність застосування знань в предметних галузях. На основі використання технології семантичних мереж для мобільних широкосмугових телекомунікаційних систем четвертого покоління розроблено алгоритми, моделі і методи та прототип інтелектуальної системи багатокритеріального вибору оптимального провайдера мобільного зв'язку для передавання мультимедійного трафіку тут і зараз для користувача. Удосконалено та розширено функціональну архітектуру інтелектуальної системи керування складною розподіленою динамічною системою, що базується на семантичному підході до формалізації знань про функціонування наявної системи. Розроблено методику створення метаданих, необхідних для інтеграції інформаційних ресурсів, вирішення

задач сприйняття та розпізнавання в інтелектуальних інформаційних технологіях. На основі аналізу моделей метаданих та підходів до їх застосування в задачах інтеграції інформаційних ресурсів та інтероперабельної взаємодії інформаційних об'єктів розроблено алгоритми та методи пошуку і компоновки онтологічних сервісів у середовищі інтелектуальних інформаційних технологій [12].

Участь відділу в діяльності технічного комітету із стандартизації України ТК-20 «Інформаційні технології». Починаючи з 1997 року відділ комплексних досліджень інформаційних технологій брав активну участь в діяльності технічного комітету із стандартизації України ТК-20 «Інформаційні технології», (був утворений у системі національної стандартизації України). Головою технічного комітету ТК-20 призначено на той час директора Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем Гриценка Володимира Ілліча.

Метою створення ТК-20 було забезпечення гармонізації українських стандартів у сфері інформаційних технологій із міжнародними стандартами (*ISO/IEC JTC 1, IEEE, CEN/CENELEC*). В організаційному плані секретаріат комітету ТК-20 працював на базі ДП «УкрНДНЦ» (Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості). ТК-20 забезпечував міжнародну інтеграцію – представляв Україну в роботі міжнародних технічних комітетів *ISO/IEC*, відповідальних за стандартизацію ІТ.

Основними завданнями ТК-20 були: розроблення та впровадження ДСТУ у сфері інформаційних технологій; адаптація міжнародних стандартів *ISO/IEC* до українських умов; стандартизація програмного забезпечення та інформаційних систем, забезпечення процесів розроблення, тестування, впровадження; інформаційна безпека, створення та впровадження стандартів захисту даних і кібербезпеки; сумісність та інтероперабельність, забезпечення взаємодії між різними ІТ-системами, протоколами та форматами даних; методична підтримка, консультації та експертиза для державних органів, бізнесу й освітніх установ щодо застосування стандартів.

ТК-20 став першим системним майданчиком для стандартизації ІТ в Україні. Його діяльність заклала основу для розвитку національних стандартів у сфері ІТ, дала змогу інтегрувати українську систему стандартизації цього напрямку у міжнародний простір, створити базу для подальшого розвитку спеціалізованих комітетів. Ядром ТК-20 був технічний підкомітет ПК-6 «Телекомунікації та обмін інформацією між системами», який був у веденні відділу комплексних досліджень інформаційних технологій. Підкомітет ПК-6 забезпечував стандартизацію взаємодії між різними ІТ-системами та мережами. Основні завдання ПК-6: розроблення та адаптація стандартів телекомунікаційних протоколів забезпечення сумісності між різними мережними технологіями та системами передачі даних; стандартизація форматів обміну інформацією – визначення єдиних правил

для структур даних, повідомлень та інтерфейсів, щоб системи могли коректно взаємодіяти; інтероперабельність ІТ-систем — узгодження вимог до апаратного та програмного забезпечення для забезпечення їхньої взаємодії у гетерогенних середовищах; гармонізація з міжнародними стандартами *ISO/IEC* та *ITU-T* — адаптація світових стандартів у сфері телекомунікацій та інформаційного обміну до українських умов; інформаційна безпека у процесах обміну даними — впровадження вимог щодо захисту інформації під час передачі між системами; методична підтримка та експертиза — надання рекомендацій державним органам, бізнесу та освітнім установам щодо впровадження стандартів у сфері телекомунікацій.

Підкомітет ПК-6 має у своєму арсеналі великий перелік розроблених стандартів ДСТУ, гармонізованих з міжнародними, словники термінів з інформаційних технологій, розробки перспективних планів розвитку стандартизації України, участь у міжнародній стандартизації — фахівці з ПК-6 брали участь у роботі *ISO/IEC JTC 1/SC 6 «Telecommunications and information exchange between systems»*, що забезпечувало представництво України у міжнародній діяльності зі стандартизації.

Розроблено за весь час існування 162 ДСТУ, 14 тлумачних словників з інформаційних технологій, гармонізованих з міжнародними, що має значення для України та забезпечує: єдину нормативну базу для телекомунікаційних систем; сумісність українських ІТ-рішень із міжнародними; підвищення рівня кіберзахисту при обміні даними; можливість інтеграції у глобальні мережі та стандарти тощо. Велике значення мають останні розроблені стандарти Європейського Союзу *ETSI* та міжнародні стандарти *ISO/IEC JTC 1/SC 6* у сфері бездротових телекомунікаційних мереж та, стандарти, що регламентують роботу та обмін інформацією в безпілотних літальних апаратах.

Прогноз фізіологічних процесів людини в екстремальних умовах. Співробітники відділу розробили інформаційні технології для прогнозу фізіологічних станів людини в екстремальних умовах, побудовані на базі компартментальних моделей. Технології було використано для оцінки здоров'я людини за динамічними характеристиками фізіологічних систем організму людини та розроблення засобів захисного спорядження людини, яка працює в екстремальних умовах. В подальшому було одержано нові результати в комплексній оцінці функційного стану людини в умовах змінного середовища та динаміки фізичних навантажень для різних варіантів захисного спорядження і систем життєзабезпечення за жорстких обмежень гарантованої безпеки середовища для людини. Створено програмно-інформаційне середовище, яке реалізує взаємодію названих факторів в звичайних і екстремальних умовах. Роботу було виконано в рамках Сьомої рамочної Європейської програми Марії Кюрі. Розроблено математичні моделі, які відображають кисневий режим тканин людини. На базі інформаційних технологій виконано прогнози енер-

гетичного стану людини в екстремальних умовах. Досягнуті результати сприяють запобіганню ішемічних і кардіореспіраторних захворювань [13].

Неперервна освіта. В контексті завдань неперервної освіти було створено комплекс освітніх програм розвитку дітей з використанням інформаційно-комунікаційних систем в навчальному процесі. Зроблено узагальнення і визначено поняття інформаційно-освітнього простору, його компонентів та структури. Створено авторську програму розвитку мислення дітей від 1 до 3 років, у якій закладено концептуальні підходи до виховання інформаційної культури, починаючи з малку. Удосконалена програма навчально-розвивального курсу «Логіки світу» для дітей 4–12 років. Розроблено підхід до розгляду інформаційних технологій як особливого інформаційного середовища навколо дитини, яке огортає всі традиційні середовища, що розглядаються у документах дошкільної освіти (природне середовище, предметно-ігрове середовище, соціальне середовище, середовище власного «я» дитини). Запропоновано інтеграційну модель поетапного формування знань, умінь та навичок з основ інформатики, де закладено можливості реалізації особистісно орієнтованого навчання (через форми та методи навчання), урахування актуальних потреб суб'єктів навчального процесу в опануванні сучасних інформаційних та телекомунікаційних технологій. Розроблено навчальні та методичні матеріали для розвитку творчих здібностей учнів початкової та середньої школи. Апробовано та впроваджено в навчальний процес методіку інноваційної підготовки учнів основної школи (5–7 кл.). Розроблено авторську програму та методичні матеріали для вчителів курсу «Основи інформатики та обчислювальної техніки», яку було рекомендовано для використання у навчальному процесі Науково-методичним центром Управління освіти Головіської районної державної адміністрації у м. Києві [59–64].

Наукові розробки, що виконуються зараз

Цифрові платформи. Джерелом розвитку інформаційного суспільства вважається інформація, а інструментом розвитку інформаційного суспільства слугують інформаційні технології. Цифрові платформи (ЦП) виступають як засіб і канал для забезпечення доступу і отримання споживачами та бізнесом цифрових товарів і послуг та використовують певні механізми і алгоритми для реалізації власного функціоналу. Проведено класифікацію ЦП, яка дозволяє порівняти їх властивості та зрозуміти відмінності, та допомагає обрати ЦП для використання. Як критерій класифікації можуть застосовуватися одна або сукупність характеристик. Класифікація за однією ознакою найчастіше встановлює подібність ЦП на основі: функційного призначення; сфери діяльності; моделі монетизації; регіону поширення та використання; режиму керування; права власності тощо. Класи-

фікація за сукупністю характеристик базується на: подібності архітектурної конфігурації, характеристиках інфраструктури, екосистеми та послуг; характеристиках бізнес-моделі; особливостях використання мережі, технічних ресурсів та програмного забезпечення різних рівнів. Побудовано математичну модель задачі класифікації ЦП з використанням теорії комбінаторної оптимізації [15, 16].

Процес проектування та експлуатації ЦП супроводжується невизначеністю, яка обумовлена розосередженістю учасників екосистеми і розмитістю меж між різними продуктами, ринками та галузями. Невизначеність є результатом технологічної складності ЦП, непередбачуваної поведінки споживачів, конкурентної боротьби між платформами та учасниками екосистеми всередині платформи, зовнішнього впливу політичних чи регуляторних змін. Невизначеність виникає внаслідок як об'єктивних, так і суб'єктивних причин, причому різні типи невизначеності по-різному впливають на учасників екосистеми ЦП з різними ролями. Досліджено чинники виникнення та види невизначеності, які ґрунтуються на: неповноті вхідної і поточної інформації; нечіткості розроблених правил обробки та оцінки інформації; ситуації ризику, що супроводжується неоднозначністю щодо обрання варіанту дій під час взаємодії та прийняття рішень учасниками екосистеми ЦП. Досліджено підходи до вирішення проблем невизначеності за рахунок збору інформації та поглиблення знань, еволюції бізнес-моделі, адаптації дизайну ЦП, застосування спеціальних механізмів стратегії керування. В межах теорії комбінаторної оптимізації для вирішення проблем невизначеності змодельовано та побудовано математичні моделі задачі з теорії масового обслуговування та задачі з теорії ігор. В обох випадках невизначеність пов'язана з особливою структурою аргументу цільової функції. Аналіз ситуації за деякий проміжок часу дозволяє встановити певну закономірність і врахувати її з метою пом'якшення або усунення впливу невизначеності на підприємницьку діяльність учасників екосистеми ЦП.

Хмарні обчислення. Поняття «хмарні обчислення» – це модель, яка забезпечує зручний доступ за запитом через мережу до спільного пулу налаштованих обчислювальних ресурсів (наприклад, мереж, серверів, сховищ даних, додатків і служб), які можуть бути швидко надані та звільнені з мінімальними управлінськими зусиллями або взаємодією з постачальником послуг.

Ознаки, які використовуються у визначенні поняття хмарних обчислень, відзначаються високим рівнем складності. Вони охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти, що вимагає від фахівців глибоких знань у сферах інформаційних технологій, мережевої інфраструктури, безпеки даних та керування ІТ-ресурсами. Такий багаторівневий підхід обумовлює необхідність комплексного розуміння термінів і процесів, що лежать в основі хмарних обчислень [17 – 19].

Основні напрями розвитку досліджень в сфері онтологічного аналізу [20 – 34]. Основні досягнення у сфері онтологічного та семантичного аналізу:

- Розроблено новаторський та фундаментальний напрям створення онтологічних моделей складних багатокомпонентних інформаційних об'єктів на основі математичної логіки Лесьневського та її мереологічного підходу («частина-ціле»), який репрезентує складні об'єкти як сукупність (систему) взаємопов'язаних компонентів із чіткими структурними відношеннями. Мереологічні моделі забезпечують математичну строгість і семантичну точність при моделюванні складноструктурованих об'єктів, що є обов'язковою передумовою для створення ефективних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у техніці, управлінні та безпеці.

- Розроблено методи динамічного поповнення онтологій, які, на відміну від традиційних підходів до онтологічного моделювання, забезпечують моніторинг змін відкритих семантично-розмічених вікі-ресурсів, визначають та додають релевантні концепти, їхні відношення, атрибути до початкової онтології для її оновлення та поповнення. Це забезпечує ефективне розширення термінологічної бази у нових, слабоформалізованих предметних областях та автоматизує процес формування онтологій у різних галузях.

- Вперше розроблено метод зіставлення онтологічних моделей складних інформаційних об'єктів, який на відміну від традиційних методів ґрунтується на комплексі критеріїв семантичної близькості та поєднує кількісні метрики і контекстні критерії, що збільшує точність результатів встановлення подібності онтологічних моделей досліджуваних об'єктів та підвищує якість роботи онтологічно-орієнтованих інформаційних систем та застосунків.

- Розроблено алгоритми розподілу завдань в рої безпілотних літальних об'єктів (БПЛА), які поєднують метод розподілу завдань між агентами на основі їхніх ролей з методом динамічного планування на основі онтологічної моделі, що забезпечує можливість динамічного перерозподілу завдань в рої БПЛА, ефективність використання обмежених ресурсів та можливість динамічно змінювати план місії, підвищувати живучість системи та адаптивність до збоїв.

- Розроблено способи інтелектуального оброблення текстів, що базуються на поєднанні семантичних тезаурусів та алгоритмів класифікування, що дає змогу підвищити точність виявлення ключових концептів та відношень між ними, мінімізувати «інформаційний шум». Завдяки впровадженню нечіткої логіки та врахуванню особливостей української мови, розроблена технологія забезпечує якісно новий спосіб побудови онтології предметної галузі на основі текстових даних.

- Розроблено комплексну технологію для автоматизованого видобування знань із текстових масивів, де основну увагу приділено еволюціонуванню побудови онтологій від семантичного збагачення термінів

до ієрархічного структурування прихованих відношень. Використання апарату нечітких множин під час оброблення текстів дало змогу ефективно формалізувати складні галузеві знання, враховуючи граматичну варіативність мови для подальшого їх використання.

Комбінаторна оптимізація [35–49]. Багато прикладних задач зводяться до задач комбінаторної оптимізації. Вони задаються однією або кількома базовими множинами, між елементами яких можуть бути зв'язки або вони відсутні. За обчисленням цільової функції виділено задачі які відносяться до статичних та динамічних. Виділено ознаки, за якими встановлюється подібність цих задач. Задачам комбінаторної оптимізації властива симетрія, яка пов'язана з симетрією комбінаторних множин. Для виявлення властивостей комбінаторної оптимізації проведено аналіз прикладних задач, які зведено до задач комбінаторної оптимізації, виявлено загальні їх особливості. Для них розроблено математичну постановку, яка враховує властивості широкого класу задач, запропоновано метод їх моделювання. За аргументом цільової функції прикладні задачі розділено на підзадачі, встановлено їх подібність. Невизначеність в цих задачах з'являється завдяки особливій структурі множини комбінаторних конфігурацій. Встановлення симетрії в задачах цього класу проведено шляхом аналізу симетрії комбінаторних конфігурацій, які є аргументом цільової функції.

- Розроблено новий метод моделювання прикладних задач комбінаторної оптимізації, який враховує їх комбінаторну природу.

- Розроблено новий метод розв'язання задач комбінаторної оптимізації різних класів, що ґрунтується на розпізнаванні структури вхідної інформації та названий методом структурно-алфавітного пошуку. Збіжність методу доведено на підкласах розв'язних задач.

- Для генерування комбінаторних конфігурацій розроблено універсальний рекурентно-періодичний метод, який ґрунтується на властивості періодичності, що характерна для упорядкування комбінаторних множин. Розроблено програмне забезпечення для генерування комбінаторних конфігурацій різних типів.

- Розроблено метод для розв'язання перелічувальних задач в комбінаториці.

- Розроблено підхід до розв'язання прикладних задач комбінаторної оптимізації гібридними алгоритмами.

- Описано ситуацію невизначеності, яка виникає в задачах комбінаторної оптимізації, та подано її класифікацію. Розроблено самоналагоджувальні алгоритми для вирішення проблеми невизначеності.

- З використанням комбінаторики розроблено конструкцію нового типу координатного комутатора, який є одним із основних елементів в теорії телекомунікацій. Отримано патенти на винахід [65–66].

- З використанням теорії комбінаторної оптимізації побудовано математичні моделі прикладних задач, які виникають в різних галузях (системах автоматизованого конструкторського проектування,

георозподілених інтелектуальних динамічних системах, розпізнанні мовленнєвих сигналів, клінічній діагностиці, телекомунікації тощо) та запропоновано обчислювальні схеми їх розв'язання. Для деяких з них розроблено програмне забезпечення [46–49].

- З використанням комбінаторного аналізу та теорії комбінаторної оптимізації досліджено комбінаторну природу деяких задач штучного інтелекту та зведено їх до задач комбінаторної оптимізації.

Мобільне здоров'я. Методи та засоби [50–58]. Науково-дослідні роботи тематичної групи «Мобільне здоров'я. Методи та засоби» виконувалися за фундаментальними та прикладними темами. Крім цього виконувалися науково-дослідні роботи за грантами НАН України для молодих учених.

В основу інформаційних технологій покладено математичні моделі фізіологічних реакцій людини за різних умов середовища, інтенсивності фізичної активності, одягу та захисного спорядження людини. Використання цих інформаційних технологій дає можливість одержати попереджувальний прогноз стану людини в різних умовах середовища, що дає можливість знизити ризики, а іноді й запобігти порушенню здоров'я людини.

В їх основу покладено розробку мультифункційної платформи прогнозування термофізіологічного стану людини за екстремальних умов середовища, яка за допомоги хмарних технологій поєднала сучасні математичні моделі фізіологічних систем людини з найновітнішими досягненнями мобільних технологій. Мультифункційна платформа містить комплекс програмних модулів для вирішення завдань перебування людини в екстремальних умовах середовища, а саме: за високої чи за низької температури повітря, за підвищеної вологості повітря, в холодній воді, під час інтенсивної фізичної активності тощо. Спроектовано багаторівневу клієнт-серверну архітектуру, яка забезпечує логічне та фізичне розмежування обчислювальних ресурсів. Серверна частина системи складається з програми керування потоками даних, сервісної платформи, бази персональних даних і бази даних результатів прогнозування. Клієнтську частину системи реалізовано як набір клієнтських застосунків для мобільних, десктопних платформ і вебплатформ, призначених для введення, перевірки передавання даних на сервер і подальшого відображення результатів прогнозування.

Мультифункційна платформа дає змогу отримати прогноз і багатопараметрично оцінити вплив на термофізіологічний стан людини різних умов повітряного і водного середовища, різних видів та різної інтенсивності фізичної активності, різних ансамблів одягу та захисного спорядження; оцінити ступінь адаптації людини до інтенсивної фізичної активності в спекотних умовах середовища; прогнозувати час до настання перегрівання і зневоднення або переохолодження організму людини за екстремальних умов середовища; отримати прогноз впливу на людину електромагнітної гіпертермії в



Співробітники відділу зліва направо. Гладун А.Я., Марочкіна Т.М., Павленко Н.Є., Тимофієва Н.К., Урсатєв О.А., Лапа О.П., Кулик А. В., Шевченко С.А., Хала К.О., Лозінський А.П., Богатєнкова А.І.

радіочастотному діапазоні; дослідити вплив випромінювання мобільного телефону на температуру мозку людини; оцінити температурний комфорт людини в приміщенні.

Інформаційні технології в освітньому процесі. Продовжено дослідження проблеми застосування в освітньому процесі комп'ютерних інноваційних технологій та персоналізованого навчання як нової педагогічної технології.

Здійснено огляд та аналіз зарубіжних і вітчизняних досліджень у галузі впровадження персоналізованого навчання в закладах освіти.

Досліджується стан викладання розділів дискретної математики (комбінаторного аналізу) в профільних класах закладів загальної середньої освіти задля підготовки майбутніх програмістів.

Розроблено напрями та програму використання штучного інтелекту в освітніх технологіях, зокрема для персоналізації навчання, що допомагає забезпечувати платформу для доступу до навчального контенту, ресурсів і можливостей навчання відповідно до потреб кожного учня.

Зроблено аналіз переваг та ризиків використання генеративного штучного інтелекту в освітньому процесі. За результатами досліджень підготовлено робочі матеріали для подальшого опрацювання та доповідь «Аналіз ризиків використання штучного інтелекту в освіті» для тематичної школи «Розвиток теорії та методів комбінаторної оптимізації в задачах штучного інтелекту». Отримані результати є вагомими для вирішення завдання впровадження персоналізованого навчання в умовах цифрової трансформації освіти.

Розроблено загальну концепцію впровадження у закладах дошкільної освіти міжнаукової інтеграції у STREAM-технології. Визначено роль кожного напрямку STREAM у пізнавальній діяльності дошкільнят.

Сходінками пізнання можуть бути такі. Створення емоційного образу об'єкта за допомоги живопису, музики, танцю, літератури тощо. Взаємодоповнення та порівняння враження, активізація власного досвіду дитини. Перехід від емоційного образу до наукового. Визначено та узагальнено особливості міжнаукової інтеграції напрямів *STREAM*-технології – природничих наук, технології, роботи над змістом текстів, інжинірінгу (конструювання), мистецтва, математики. Розроблено методичні рекомендації і матеріали для практичної інтегрованої роботи з дітьми всіх дошкільних груп – молодшої, середньої, старшої.

Досліджено, як вихователі-методисти і вихователі можуть ефективно і доречно у підготовці до занять використовувати штучний інтелект. Найперше – у підготовці до занять, створенні матеріалів для роботи з дітьми тощо. По-друге, створенні розгорнутих планів занять, але виходить спрощено і не креативно. По-третє, акумуляції ідей для планування власної роботи. По-четверте, набутті досвіду, розвитку професійних вмінь.

Перспективи розвитку наукових досліджень

До перспективних досліджень відділу віднесемо такі наукові напрями:

1. Комбінаторика, комбінаторна оптимізація.

Напрями використання теорії комбінаторної оптимізації та комбінаторного аналізу в інформаційних технологіях.

Теорія знакових комбінаторних просторів.

Комбінаторна оптимізація в задачах штучного інтелекту.

Метод структурно алфавітного пошуку оптимального розв'язку в задачах комбінаторної оптимізації.

Комбінаторика в теорії телекомунікації.

2. Основні напрями розвитку досліджень у сфері онтологічного аналізу.

3. Цифрові платформи.

4. Платформи хмарних обчислень.

5. Машинне навчання.

6. *STREAM*-технології в системах освіти.

7. Комп'ютерні моделі прогнозування життєздатності людини під час планування військових і рятувальних операцій за різних умов середовища.

Висновки

Таким чином, співробітники відділу комплексних досліджень інформаційних технологій за час існування відділу започаткували і розвинули ряд важливих для різних сфер народного господарства наукових напрямів, пов'язаних з інформаційними технологіями. Вони стосуються дослідження та впровадження сучасних систем керу-

вання в різних галузях народного господарства, розвитку теорії штучного інтелекту, онтології, комбінаторної оптимізації, мобільного здоров'я, інформаційних технологій в освітньому процесі тощо. Подальший розвиток наукових досліджень відділу пов'язаний з розвитком теорії комбінаторної оптимізації, розробленням нових підходів до розв'язання прикладних задач в рамках цієї теорії, розвитком онтологічного аналізу, теорії цифрових платформ і хмарних обчислень, питань, пов'язаних з медициною, з освітнім процесом тощо.

DECLARATION / ПОВІДОМЛЕННЯ

У цьому розділі автори заявляють про:

- застосування ШІ та інших інструментів відповідно політики журналу;
- конфлікти інтересів – тут розкривають їх наявність і вид або відсутність;
- гранти або фінансова підтримка дослідження – за потреби інформувати;
- подяки, тощо.

REFERENCES / ЛІТЕРАТУРА

1. Gritsenko V.I., Panchenko A.V., Lapa A.P. *Problem-oriented modeling of production and transportation systems*. Monografiya. Naukova dumka, Kyiv, 1987, 158 p. [In russian]
2. Gritsenko V.I. Miroshnichenko V.M. *Application of mathematical methods in transport. Part 1. Design of transport systems and technical means of transport*. Naukova dumka, Kyiv, 1977, 304 p. [In russian]
3. Gritsenko V.I. *Application of mathematical methods in transport. Part 2., Planning, management of the transportation process*. Naukova dumka, Kyiv, 1977, 320 p. [In russian]
4. Gritsenko V.I. *Information technology: development and application issues*. Monograph. Naukova dumka, Kyiv, 1988, 268 p. [In russian]
5. Miroshnychenko V.M. *Information technologies on transport: Industrial transport*. Monograph. Naukova dumka, Kyiv, 1990, 200 p. [In russian]
6. Gritsenko V.I. *State navigation and hydrographic information system. Conception. Realisation*. Monograph, Naukova dumka, Kyiv, 1999, 124 p. [In russian]
7. Panshin B.N. *Distributed information systems for wide application. Conception. Development and implementation experience*. Naukova dumka, Kyiv, 2005, 317 p. [In russian]
8. Gritsenko V.I. *Modern information technologies for data storage and calculations*. Naukova dumka, Kyiv, 2016. [In russian]
9. Del Rio B. *Automation of operations management on railway transport of a metallurgical factory. Resp. Conf. DNTP, 1964, Dnipropetrovsk, Vol. 5, 87–91*. [In russian]
10. Gritsenko V.I. Bogemskii V.A. et all. *Information technologies on transport: Industrial transport*. Monograph, Naukova dumka, Kyiv, 1990, 200 p. [In russian]
11. Lapa A.P. *About one of the modifications of the method of conditional modeling of rolling stock transportation on the railway network*. Sb. *Problemy planirovaniya i upravleniya transportom*, Kyiv, 1974, Vol. 5, 18–22. [In russian]
12. Gladun A.Ya. *About application of temporal and stochastic Petra networks in tasks of evaluating the performance of high-speed communication networks. Kibernetika i vychislitel'naâ tehnika*, Kyiv, 1994, Vol. 103 (8), 102–109. [In russian]
13. Gritsenko V.I., Yermakova I.I., Lyabakh K.G. *Information technologies for estimation of functional state of human interacted with environment. Kibernetika ta Systemnyi Analiz*, Kyiv, 1995, Issue 3, 181–189. [In russian]
14. Gritsenko V.I., Ursatev A.A. *Distributed information systems for wide application. Conception. Development and implementation experience*. Monograph, Naukova dumka, Kyiv, 2005, 317 p. [In russian]

15. Tymofiiieva N.K., Pavlenko N.Ye. Some Approaches to Addressing Uncertainty on Digital Platforms. *Information Technologies and Systems*, 2025, Vol. 5 (5), 3–21. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.05.003> [In Ukrainian]
16. Tymofiiieva N.K., Pavlenko N.Ye., Shevchenko S.A. Ways of Classifying Digital Platforms. *Control systems & computers*, 2024, Issue 2, 10–20. <https://doi.org/10.15407/csc.2024.02.010> [In Ukrainian]
17. Gritsenko V.I., Ursatev A.A. Cloud Computing and cloud model for provide of IT service. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*, Kyiv, 2013, Vol. 171, 5–19. [In russian]
18. Lozinskyi A.P. Synthesis of Cloud Computing Platform Technologies. *Control Systems and Computers*, 2019, Issue 6, 35–45. <https://doi.org/10.15407/csc.2019.06.035>
19. Lozinskyi A., Gladun A. Optimizing the Energy Consumption of On-site Private Cloud Computing Platforms. *CEUR Workshop Proceedings*, 2025, Vol. 4049, 91–100. URL <https://www.scopus.com/pages/publications/105018671249>
20. Gladun A.Ya. Rohushyna Yu.V. *Semantic technologies: principles and practices*. Monograph, ADEF-Ukraine, Kyiv, 2016, 347 p. [In Ukrainian: Гладун А.Я. Рогущина Ю.В. Семантичні технології: принципи та практики.]
21. Rohushyna Yu.V., Gladun A.Ya., Osadchyi V.V., Pryima S.M. *Ontological analysis on the Web*. Monograph. MDPU im. Bohdana Khmelnytskoho, Melitopol, 2015, 407 p. [In Ukrainian: Рогущина Ю.В., Гладун А.Я., Осадчий В.В., Прийма С.М. Онтологічний аналіз у Web]
22. Rogushina J., Gladun A. Task Thesaurus as a Tool for Modeling of User Information Needs. *Studies in Computational Intelligence*, Springer International Publishing, 2021, Vol. 966, 385–403. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71115-3_17
23. Rogushina J., Gladun A. Mereological Approach for Formation of Part-Whole Relations between Pages of a Semantic Wiki-resource. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, Vol. 3241, 237–247. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3241/paper22.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]
24. Gladun A., Khala K., Martinez-Bejar. Development of Object's Structured Information Field with Specific Properties for Its Semantic Model Building. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, Vol. 3241, 102–111. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3241/paper10.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]
25. Rogushina J., Gladun A. Semantic Approach to Decision Making in Comparison of Complex Objects. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, Vol. 3503, 102–114. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3503/paper10.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]
26. Rogushina J., Gladun A. Ontology-Based Similarity Estimates for Fuzzy Data: Semantic Wiki Approach. In: Daimi, K., Alsadoon, A., Coelho, L. (eds) *Cutting Edge Applications of Computational Intelligence Tools and Techniques*. *Studies in Computational Intelligence*. Springer, Cham, 2023, Vol. 1118, 1–15. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44127-1_15
27. Rogushina J., Gladun A., Valencia-Garcia. Reuse of Ontological Knowledge in Open Science: Models, Sources, Repositories. In: *Technologies and Innovation, (CITI 2023)*, 2023, Vol. 1873, 157–172. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45682-4_12
28. Gladun A., Khala K. Using an Ontology-Based Multi-Agent System for Decentralized Control of a Swarm of UAVst. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, Vol. 3887, 205–214.
29. Gladun A., Rogushina J., Martinez-Bejar. UKR at EmoSPeech-IberLEF2024: Using Fine-tuning with BERT and MFCC Features for Emotion Detection. In: *CEUR Workshop, IberLEF 2024, Iberian Languages Evaluation Forum 2024*, Valladolid, Spain. s. 2024, Vol. 3756, 66–72. URL: http://ceur-ws.org/Vol-3756/EmoS Peech2024_paper9.pdf [Accessed 24 Mar. 2026]
30. Gladun A., Khala, K., Subach I. Ontological approach to big data analytics in cybersecurity domain. *Collection «Information Technology and Security»*, (2020), Vol. 8 (2), 120–132. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2020.8.2.222559>
31. Rogushina J.V., Gladun A.Y. Application of ontological analysis for metadata processing in the interpretation of BIG DATA at the semantic level. *Problems in programming*, 2020, Issue 4, 55–70. <https://doi.org/10.15407/pp2020.04.055>

32. Pryima S.M., Strokan O.V., Rogushina J.V., Gladun A.Y., Mozhovenko A.A. Methods and tools for developing an information system for validation of non-formal learning outcomes. *Problems in programming*, 2020, Issue 2-3, 50-60. <https://doi.org/10.15407/pp2020.02-03.050>
33. Khala K.O., Gladun A.Ya. Expanding the Capabilities of Ontological Modeling of Legal Knowledge Using Elements of Fuzzy Logic. *Cybernetics and computer engineering*, 2024, Vol. 218 (4), 29-53. <https://doi.org/10.15407/kvt218.04.029>
34. Rogushina J., Gladun A., Pryima S., Anishchenko O., Mykytiuk A. Expanding the semantic markup of wiki encyclopedias for transformation of protected content into learning objects for individual educational trajectories. *Collection «Information Technology and Security»*, 2024, Vol. 12 (2), 162-183. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.2.315732>
35. Timofeeva N.K. Subclasses of solvable problems from the classes of combinatorial optimization problems. *Kibernetika ta Systemnyi Analiz*, Kyiv, 2009, Issue 2, 97-105. [In russian]
36. Timofeeva N.K. On Nature of Uncertainty and Variable Criteria in the Partition Problems. *Problems of Control and Informatics*, 2009, Issue 5, 88-99. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v41.i9.30>
37. Timofeeva N.K. Dependence Of Objective Function On Several Variables In Location Problem And Its Solution By The Method Of Structurally-Alphabetical Search. *Kibernetika ta Systemnyi Analiz*, 2013, Issue 2, 106-114. URL: <http://www.kibernetika.org/volumes/2013/numbers/02/articles/11/ArticleDetailsEU.html> [Accessed 24 Mar. 2026]
38. Tymofijeva N. Significant combinatorial space and artificial intelligence. *Artificial intelligence*, 2015, Vol. 67-68 (1-2), 180-189. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/f64408ff-569a-4d1a-9d04-db9fdc20ced0/content> [Accessed 24 Mar. 2026]
39. Tymofijeva N.K. Modeling of symmetry in combinatorial optimization. *Problems of Control and Informatics*, 2018, Issue 3, 15-27. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.30>
40. Timofeeva N.K. Some Ways to Modeling Input Data for Information Search in a Model Library when Solving Semantics Problems. *Problems of Control and Informatics*, 2020, Issue 6, 16-28. URL: <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0001260201> [Accessed 24 Mar. 2026]
41. Tymofijeva N.K. Sign Information Space and Golden Ratio. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2021, Issue 5, 35-42. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00395-1>
42. Tymofijeva N.K. The Fractal Nature of Combinatorial Sets and Finding Formulas for Combinatorial Numbers. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2020, Issue 1, 129-137. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00226-9>
43. Tymofijeva N.K. Artificial Intelligence Problems and Combinatorial Optimization. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2023, Vol. 59 (4), 3-11. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00586-y>
44. Tymofijeva N.K., Gritsenko V.I. Modeling and Solving an Application Problems of Combinatorial Optimization Arised in Intelligent Geodistribution Dynamical Systems. *Control Systems and Computers*, 2014, Issue 1, 8-25. URL: <http://usim.org.ua/arch/2014/1/3.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]
45. Timofeeva N.K. Some Natural Phenomena and Sign Combinatorial Spaces. *Problems of Control and Informatics*, 2020, Issue 3, 5-18. URL: <https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/465> [Accessed 24 Mar. 2026]
46. Gritsenko V.I., Tymofijeva N.K. An Argument of the Objective Function in the Problems of Clinical Diagnostics. *Control Systems and Computers*, 2012, Issue 3, 3-14. URL: <http://usim.org.ua/arch/2012/3/2.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]
47. Tymofijeva N.K., Gricenko V.I. The Solution of a Planning Problem From the Theory of Time-Tables by the Method of Structurally-Alphabetical Search and a Hybrid Algorithm. *Control Systems and Computers*, 2011, Issue 3, 21-36. URL: <http://usim.org.ua/arch/2011/3/4.pdf> [Accessed 24 Mar. 2026]

48. Tymofijeva N.K., Grytsenko V.I. Combinatorial is in a problems of artificial intellect. *Control Systems and Computers*, 2017, Issue 2, 6–19. <https://doi.org/10.15407/usim.2017.02.006>
49. Gritsenko V.I., Tymofijeva N.K. Finding Subclasses of Solvable Problems in Combinary Optimization and Artificial Intelligence by Structure of Input Information. *Cybernetics and Computer Engineering*, 2022, Vol. 207, 5–17. <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.005>
50. Bielov V.M., Vovk M.I., Hryhorian.D., Yermakova I.I. et al. The most important achievements of biological and medical cybernetics in the 20th century. In: Alekseev V.A. et al. *State and prospects of development of informatics in Ukraine*. Monograph. NAS of Ukraine, Naukova dumka, Kyiv, 2010, 1006 p. 842–894. ISBN 978-966-00-0972-0. [In Ukrainian: Белов В.М., Вовк М.І., Григорян Р.Д., Єрмакова І.І. та ін. Найважливіші досягнення біологічної і медичної кібернетики у ХХ столітті]
51. Troynikov O., Nawaz N., Yermakova I. Materials and engineering design for human performance and protection in extreme hot conditions. *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 633, 169–180. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.633.169>
52. Dorosh N.V., Boyko O.V., Ilkanych K.I., Zayachkivska O.S., Basalkevych O.Y., Yermakova I.I., Dorosh O.I. M-health technology for personalized medicine. In: *Development and modernization of medical science and practice: experience of Poland and prospects of Ukraine*. Monograph, Vol. 1, Izdevnieciba “Baltija Publishing”, Lublin, 2017, 66–85.
53. Potter A.W., Yermakova I.I., Hunt A.P., Hancock J.W., Oliveira A.V.M., Looney D.P., Montgomery L.D. Comparison of two mathematical models for predicted human thermal responses to hot and humid environments. *Journal of Thermal Biology*, 2021, Vol. 97, Article 102902. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102902>
54. Yermakova I.I., Potter A.W., Raimundo A.M., Xu X., Hancock J.W., Oliveira A.V.M. Use of thermoregulatory models to evaluate heat stress in industrial environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, Vol. 19 (13), Article 7950. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137950>
55. Ntoumani M., Soultanakis H., Rivas E., Dugué B., Potter A. W., Yermakova I., Douka A., Gongaki K. An integrated thermal sensation scale for estimating thermal strain in water. *Medical Hypotheses*, 2024, Vol. 187, Article 111342. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2024.111342>
56. Yermakova I.I., Potter A.W., Chapman C.L., Friedl K.E. Modeling physiological and thermoregulatory responses during an Olympic triathlon. *Journal of Thermal Biology*, 2025, Vol. 131, Article 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2025.104203>
57. Yermakova I., Nikolaienko A., Hrytsaiuk O., Tadeieva J., Kravchenko P. Use a smartphone app for predicting human thermal responses in hot environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, Vol. 2(128), 39–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300784>
58. Yermakova I., Volkov O., Nikolaienko A., Hrytsaiuk O., Tadeieva J. Integrating model and smartphone technologies for cold-water thermoregulation assessment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, Vol. 6 Issue 2 (138), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.344042>
59. Stetsenko I. Computer literacy? Information culture! *Preschool Education*, Kyiv, 2015, Issue 2, 57. [In Ukrainian: Ірина Стеценко, Комп'ютерна грамота? Інформаційна культура! Дошкільне виховання]
60. Stetsenko I. *Information technologies – for all. Information: from searching for the primary source to storage*. Monograph, Oleg Filuk, Kyiv, 2017, 241 p. [In Ukrainian: Стеценко Ірина. Інформаційні технології – для всіх. Інформація: від пошуку першоджерела до зберігання]
61. Stetsenko I. Using Internet resources for continuing education of primary school teachers. *Computer in school and family*, Kyiv, 2016, Issue 4, 19–22. [In Ukrainian:

- Стеценко І. Використання інтернет-ресурсів для неперервної освіти вихователів та вчителів початкових класів]
62. Stetsenko I., Ostapenko H. *Art*. Textbook for the 3rd grade of secondary education institutions, Svitych, Kyiv, 2020, 128 p. [In Ukrainian: Стеценко І., Остапенко Г. Мистецтво. підруч. для 3 кл. закл. загал. серед. освіти]
 63. Andrusych O., Stetsenko I. *Informatic*. Textbook for the 4rd grade of secondary education institutions, Svitych, Kyiv, 2021, 96 p. [In Ukrainian: Андрусич О., Стеценко І. *Інформатика*]
 64. Litvinenko, N.I. and Zaritska, S.I. Design as a method of creating images. Tasks on graphic design in MS Paint for students of grades 5–7. *Informatics: School World*, 2013, Vol. 2 (650), 3–17. [In Ukrainian: Литвиненко Н.І., Заріцька С.І., Конструювання як метод створення зображень. Завдання з графічного конструювання в MS Paint для учнів 5–7 класів]
 65. Tymofiiieva N.K. Three-Dimensional Coordinate Switch. Utility Model Patent UA No. 99750, publ. 25.06.2015, bul. 12. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/881288/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 66. Tymofijeva N.K. Three-Dimensional Coordinate Switch with Optical Switches. Utility Model Patent UA No. 99749, publ. 25.06.2015, bul. 12. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/881525/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 67. Tymofijeva N.K. Science paper «On the nature of uncertainty and variable criteria in partitioning problems». Copyright registration certificate for the office work No. 40033, publ. 20.04.2012, bul. No. 26. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1519295/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 68. Gladun A.Ya., Rogushyna J.V. Method of Personalized Information Search. Utility Model Patent UA No.113890, publ. 27.02.2017, bul. № 4. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/808707/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 69. Tymofijeva N.K. Method for developing a printed board design for accommodating various size modules. Clime No. a202204974, publ. 30.08.2023, bul. № 35. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/17205861721832/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 70. Tymofijeva N.K. Computer program «Segmentation of speech signal into periodic and non-periodic sections». Trademark certificate No 115871, publ. 31.03.2023, bul. № 74. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 71. Tymofijeva N.K. Computer program “Program for generating a set of permutations for finding subclasses of solvable problems: the classical assignment problem, the traveling salesman problem, the problem of placing one-dimensional modules on a surface”. Copyright registration certificate for the office work No. 127889, publ. 31.07.2024, bul. № 82. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1812512/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 72. Gladun A.Ya. Computer program «Multi-agent e-commerce system with semantic personalization of user needs». Copyright registration certificate for the office work No. 115869, publ. 31.03.2023, bul. No. 74. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1731019/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 73. Tymofiiieva N.K. Method for automatic control of digital layout of printed board topology for compliance with electrical diagram. Clime No. a202402626, publ. 07.05.2025, bul. No. 19. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1799988/> [Accessed 24 Mar. 2026]
 74. Gladun A.Ya., Protsenko E.I. Mathematical methods of performance indices analysis of corporative networks with usage of stochastic Petri nets. *Problemy Unravleniya i Informatiki*, 2001, issue 3, 104–119.
 75. Gladun A.Ya., Khala K.O. Computer program «Performance analysis of a wireless network of dynamic objects based on Petri nets”. Copyright registration certificate for the office work No. 139418, publ. 31.10.2025, bul. No. 94. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1883953/> [Accessed 24 Mar. 2026]

76. Grytsenko V.I., Ursatiev O.A. Monograph «Distributed Information Systems for Wide Application. Concept. Development and Implementation Experience» Copyright registration certificate for the office work No. 42239, publ. 02.07.2012, bul. No. 27. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1521445/> [Accessed 24 Mar. 2026]
77. Yermakova I.I., Dukhnovska K.K., Bohatonkova A.I., Tadeieva Yu.P. Software product «Modeling complex for predicting human condition in hot and dry environmental conditions». Copyright registration certificate for the office work No. 45117, publ. 28.09.2012, bul. No. 28. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1524269/> [Accessed 24 Mar. 2026]
78. Yermakova I.I., Dukhnovska K.K., Bohatonkova A.I. Software product «Information module for assessing human thermal comfort». Copyright registration certificate for the office work No. 45118, publ. 28.09.2012, bul. No. 28. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1524270/> [Accessed 24 Mar. 2026]
79. Yermakova I.Yo., Bohatonkova A.I., Nikolaienko A.Yu., Solopchuk Yu.M. Computer program «Modeling complex for studying the process of human cooling in an aquatic environment». Copyright registration certificate for the office work No. 74896, publ. 26.01.2018, bul. No. 47. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1554129/> [Accessed 24 Mar. 2026]
80. Yermakova I.Yo., Nikolaienko A.Yu., Bohatonkova A.I., Hrytsaiuk O.V., Dorosh O.I., Kravchenko P.M. Computer program «Predicting the risk of human thermal state under different environmental conditions». Copyright registration certificate for the office work No. 109529, publ. 31.01.2022, bul. No. 68. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1678098/> [Accessed 24 Mar. 2026]
81. Yermakova I.Yo., Nikolaienko A.Yu., Bohatonkova A.I., Hrytsaiuk O.V., Dorosh O.I., Kravchenko P.M. Computer program «The influence of physical activity on the thermophysiological state of a person». Copyright registration certificate for the office work No. 109528, publ. 31.01.2022, bul. No. 68. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1678099/> [Accessed 24 Mar. 2026]
82. Yermakova I.Yo., Nikolaienko A.Yu., Bohatonkova A.I., Hrytsaiuk O.V., Dorosh O.I., Kravchenko P.M. Computer program «Selection of protective clothing and equipment to ensure a comfortable human condition in the aquatic environment». Copyright registration certificate for the office work No. 109527, publ. 31.01.2022, bul. No. 68. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1678100/> [Accessed 24 Mar. 2026]
83. Yermakova I.Yo., Nikolaienko A.Yu., Bohatonkova A.I., Hrytsaiuk O.V., Dorosh O.I., Kravchenko P.M. Computer program «Comprehensive assessment of a person's functional state depending on the level of physical activity, protective clothing and air and water environment conditions». Copyright registration certificate for the office work No. 109526 publ. 31.01.2022, bul. No. 68. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1678101/> [Accessed 24 Mar. 2026]

Отримано/Received 16.02.2026

Прийнято/Accepted 04.03.2026

Опубліковано/Published 30.04.2026

O.P. LAPA, Senior Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-3680-1421>
dep170@irtc.org.ua

N.Ye. PAVLENKO, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-5660-8669>
Pavnata@gmail.com

N.K. TYMOFIJEVA, DSc (Engineering), Senior Researcher, Head of the Department,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0312-1153>
TymNad@gmail.com

S.A. SHEVCHENKO, Researcher,
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine,
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-2096-3648>
shvesta@ukr.net

INFORMATION TECHNOLOGIES IN SCIENCE AND PRODUCTION

Introduction. The formation of the department is described from 1968 to the present. Its organizer and the Head was the candidate of technical sciences, in the future corresponding member of the NAS of Ukraine, Volodymyr Ilyich Gritsenko. Under his leadership, very important foundations for the development and formation of information technologies in the areas of control systems were laid, in particular, railway transport of enterprises of the metallurgical industry, the development of the theory of artificial intelligence, ontology, combinatorial optimization, models of physiological processes and human reactions under various environmental conditions, information technologies in the educational process. The employees of the department received significant scientific results, confirmed by publications in monographs, in central journals, patents for inventions, and copyright certificates for works.

Problem statement. The formation and development of information technologies over fifty years, starting from 1968 to the present, was considered. During this period, scientific research was conducted in various fields, which are united by one scientific direction. This is information technology.

The proposed approach. The example of applied problems from various fields shows the development and formation of the theory and practice of information technologies and their application in various fields of science and production.

Conclusions. During its existence, the employees of the Department of Comprehensive Research of Information Technologies have initiated and developed a number of scientific directions related to information technologies that are important for various spheres of the national economy. They concern the study and implementation of modern management systems in various branches of the national economy, the development of the theory of artificial intelligence, ontology, combinatorial optimization, mobile health, information technologies in the educational process. Further development of scientific research of the department is connected with the development of the theory of combinatorial optimization, development of new approaches to solving applied problems within the framework of this theory, development of ontological analysis, theory of digital platforms and cloud computing, issues related to medicine, educational process.

Keywords: *information technology, combinatorial optimization, railway transport management, artificial intelligence, prediction of human viability.*

AUTHOR GUIDELINES

The journal publishes the results of research in the field of computer science, information technologies and systems and their applications in various fields of activity, system analysis, intelligent control, cyber security, biological and medical cybernetics, digital economy and learning in the digital age, etc.

Target audience – scientists, engineers, graduate students and students of higher educational institutions of the relevant specialty.

Requirements for manuscripts

1. The manuscript is accepted in electronic form, if possible – on paper in one copy (language of the article – English (*in priority*) or Ukrainian, manuscript up to 30 pages). The manuscript should contain:

- information about the Authors in English and Ukrainian: Full name, Academic Degree, Academic Title, Position, Affiliations, Postal address of the organization, Direct links to author's ORCID (if necessary, Researcher ID) and E-mail, Author-correspondent and their telephone number (*for contacting the editor*);

- Short Abstract with keywords in paper language, and Extended Abstract with keywords in either Ukrainian for English-language paper or English for Ukrainian-language paper. The text of the Extended Abstract is not less than 1800 characters with spaces, by headings: *Introduction, The purpose of the paper, Methods, Results, Conclusions, Keywords* (5–8 words);

- **DECLARATIONS:** in this section the authors declare 1) *Author contributions* in accordance with CRediT Roles or another standard; 2) *AI and tools usage* in accordance with the journal policy; 3) *Conflict of interest:* existing and type of conflict or no should be disclosed; 4) *Grant or Financial Support* for the research provide information about if it necessary; 5) Thanks, etc.

- **REFERENCES** – a list of sources in English in the order of mention in the text. For Non-English-language sources, citation are translated, the original language is indicated in square brackets, for Ukrainian-language papers information about authors and the title in the original language is given. Examples for design of the References is given below;

- **LITERATURE** – a list of sources in Ukrainian do not use for English-language papers;

- if desired, the authors provide information about the grant or financial support of the research;

- the license agreement is signed automatically when the submission is created in the electronic editorial system.

2. The text of the article should be submitted with the following mandatory headings: *Introduction, Problem Statement / Problem Definition, Objective, Results, and clearly formulated Conclusions.*

Requirements for the text file

File format: *.doc, *.rtf. Applicable styles: Times New Roman font, 12 pt, without a hyphen for a line break, line spacing – 1.0. Paper size: A4, all sides – 2 cm.

Formulas are typed in Formula Editors (preferably Microsoft Equation Editor 3.0. and MathType 6.9b.) Formula Editor options are (10.5; 8.5; 7.5; 14; 10). **The width of formulas is up to 12 cm.**

Figures must be of high quality, they are provided in separate files of appropriate formats (*.png, *.jpg, *.tiff, etc.). **The width of the figures is up to 12 cm.**

Tables are created using a standard text editor built into the Table toolkit. **The width of the table is up to 12 cm.**

КЕРІВНИЦТВО ДЛЯ АВТОРІВ

В журналі друкуємо результати досліджень у сфері інформатики, інформаційних технологій та систем і їх застосувань у різних сферах діяльності, системного аналізу, інтелектуального керування, кібербезпеки, біологічної та медичної кібернетики, цифрової економіки та навчання в цифрову епоху тощо.

Цільова аудиторія — науковці, інженери, аспіранти та студенти вищих навчальних закладів відповідного фаху.

Вимоги до рукописів статей

1. Рукопис приймаємо в електронному виді, за можливості — на папері в одному примірнику (мова статті — англійська (*в пріоритеті*) або українська, рукопис до 30 стор.). Рукопис має містити:

- відомості про авторів англійською та українською мовами: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посаду, місце роботи, поштову адресу організації, прямі посилання авторських ідентифікаторів ORCID (за потреби *Researcher ID*) та *E-mail*, автор-кореспондент із номером телефону (*для зв'язку з редактором*);

- коротку анотацію з ключовими словами мовою статті та розширену анотацію з ключовими словами українською для англійської статті або ж англійською для українськомовної статті. Текст розширеної анотації не менше 1800 знаків з пробілами, за рубриками: *Introduction / Вступ, The purpose of the paper / Мета роботи, Methods / Методи, Results / Результати, Conclusions / Висновки, Keywords / Ключові слова* (5–8 слів);

- **ПОВІДОМЛЕННЯ:** у цьому розділі автори заявляють про 1) Внесок авторів відповідно до *CRediT Roles* або іншого стандарту; 2) Застосування *ШІ та інших інструментів* відповідно політики журналу; 3) Конфлікти інтересів — тут розкривають їх наявність і вид або відсутність; 4) Гранти або фінансова підтримка дослідження — за потреби інформувати; 5) Подяки, тощо.

- **ЛІТЕРАТУРА** — перелік джерел для українськомовних статей українською мовою оригіналу в порядку згадування в тексті, для неукраїнськомовних джерел посилання даються англійською, в квадратних дужках вказується мова оригіналу;

- **REFERENCES** — перелік джерел англійською мовою в порядку згадування в тексті. Для неанглійськомовних джерел в квадратних дужках вказується мова оригіналу, для українськомовних після двокрапки наводиться інформація про авторів та назва джерела мовою оригіналу. Приклади оформлення переліку посилань наведено далі;

- за бажанням автори надають інформацію про грант або фінансову підтримку дослідження;

- ліцензійний договір підписується автоматично при створенні подання в системі електронної редакції.

2. Текст статті подають з обов'язковими рубриками: *Вступ, Постановка завдання/Окреслення проблеми, Мета, Результати, чітко сформульовані Висновки.*

Вимоги до текстового файлу

Формат файлу *.doc, *.rtf. Застосовні стилі: шрифт Times New Roman, 12 пт, без переносів, міжрядковий інтервал — 1,0. Формат паперу А4, всі береги — 2 см.

Формули набирають у редакторах формул (бажано Microsoft Equation Editor 3.0. та MathType 6.9b.) Опції редактора формул — (10,5; 8,5; 7,5; 14; 10).

Ширина формул — до 12 см.

Рисунки мають бути якісними, їх надають окремими файлами відповідних форматів (*.png, *.jpg, *.tiff тощо). **Ширина рисунків — до 12 см.**

Таблиці виконують стандартним вбудованим інструментарієм «Таблиця» текстового редактора. **Ширина таблиці — до 12 см.**

Examples for design of the References

REFERENCES

Please provide for references, where its possible, the DOI in the format <https://doi.org/...> (including instead of the URL).

The Books

1. De Vooght E. *Learning to think critically*. Academia Press, Gent , 2025, 168 p. [In Dutch]
2. Ustymenko V.A. *Adaptation of national legislation to EU law: foundations, criteria, sustainability degree*. Akadempriodyka, Kyiv, 2025, 452 p. [In Ukrainian: Устименко В.А. *Адаптація національного законодавства до права Європейського Союзу: основи, критерії, виміри стійкості*]
3. Divan M. J., Johri P., Guim F., Shchemelinin D., Carranza M. *Advances in Image Processing, Reliability, and Artificial Intelligence*. Elsevier, 2025.
4. *Department of Informatics of NAS of Ukraine. Historical and Biographical Directory*. Akadempriodyka, Kyiv, 2017, 286 p. [In Ukrainian: Відділення інформатики НАН України. Історико-біографічний довідник. Академперіодика]

Papers in Periodicals / Статті в періодичних виданнях

5. Zhuoqun Xia, Longfei Huang, Jingjing Tan, Yongbin Yu, Wei Hao, Kejun Long. A lightweight intrusion detection system for connected autonomous vehicles based on ECANet and image encoding. *Journal of Information Security and Applications*, Elsevier, 2025, Vol. 92 (7), Article 104082. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2025.104082>
6. ZagorodnyA. G., Khimich O. M., Andon F. I., et al. Implementation of European principles of open science in the National Academy of Sciences of Ukraine. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2025, Vol. 1, 11–33.

Conferences Materials

7. Neumannova A. Organizational Culture and Digital Resilience: Competing Values Perspective. *17th IADIS International Conference Information Systems*, Porto, Portugal, 2024, 158-162. URL: <https://www.iadisportal.org/digital-library/organizational-culture-and-digital-resilience-competing-values-perspective> [Accessed 20 May. 2025]
8. Husna B. A., Munir R. 3D Traffic Scenes Reconstruction for Autonomous Vehicles Using Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM). *11th International Conference on Advanced Informatics: Concept, Theory and Application (ICAICTA)*, Singapore, Issue 1, 2024, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICAICTA63815.2024.10763077>

Electronic Sources

9. Information for Authors of Springer Computer Science Proceedings: Instructions for proceedings authors (pdf). URL: <https://resource-cms.springernature.com/springer-cms/rest/v1/content/19242230/data/v17> [Accessed Mar. 2025]
10. Cyrillic Gap Analysis. W3C Group Draft Note 02 April 2025. URI: <https://www.w3.org/TR/cyrl-gap/> [Accessed 26 Jun. 2025]

Приклади оформлення

ЛІТЕРАТУРИ за ДСТУ 8302:2015 для українськомовних статей

The Books / Книги

1. Adair J. *Effective management: How to save time and spend it wisely*, Pan Books, London, UK, 1988.
2. Nigmatko R.I. *Dynamics of multiphase mediums*, Naukova dumka, Kyiv, 1987. 201 p.

Книги з двома та більше авторами

1. McCarthy P. and Hatcher C. *Speaking persuasively: Making the most of your presentations*, Allen and Unwin, Sydney, NSW, 1996.
2. Gurskiy D.S., Yesipchuk K.Ye. and Kalinin V.I. *Metallic and Nonmetallic Minerals of Ukraine. Vol.1. Metallic Minerals*, Tsentr Yevropy, Kiev-Lvov, Ukraine, 2005.

Книги з невідомими авторами

1. The University Encyclopedia. Roydon, London, UK, 1985.

СТАТТІ В ЖУРНАЛАХ ТА ПЕРІОДИЧНИХ ВИДАННЯХ

Журнальна стаття

1. Bessant J. The question of public trust and the schooling system, *Australian Journal of Education*, 2001. Vol. 45, pp. 207-226.
2. Khomenko O.Ye. Control of the energy of rocks in underground ore mining, *Mining Journal. Ferrous metals*, Special Issue, 2010. pp. 41-43.
3. Slashev I. The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations, *Coal of Ukraine*, 2013. Vol. 2, pp. 40-43.

ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ

1. Better Business Bureau. Third-party assurance boosts online purchasing, available at: <http://bbbonline.org/about/press/2001/101701.asp> (Accessed 7 January 2002).
2. The official site of Dnepropetrovsk Regional State Administration. News of the region, available at: <http://adm.dp.ua/OBLADM/obldp.nsf/archive/3E8?opendocument> (Accessed 4 January 2011).
3. Young C. *English Heritage position statement on the Valletta Convention*, [Online], available at: <http://www.archaeol.freeuk.com/EHPositionStatement.htm> (Accessed 4 Aug 2011).

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

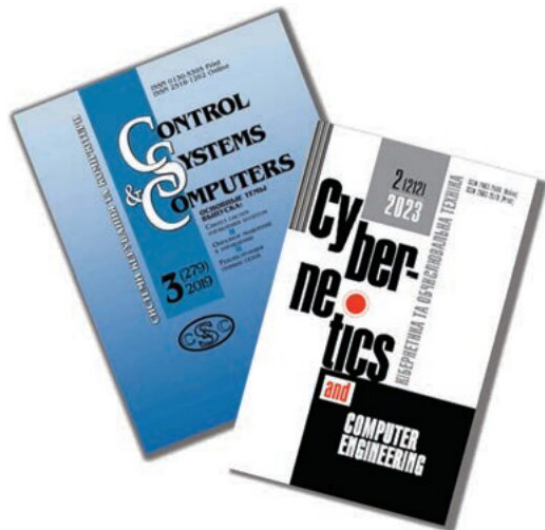
1. Lodi E., Veseley M. and Vigen J. Link managers for grey literature, *New Frontiers in Grey Literature, Proceedings of the 4th International Conference on Grey Literature, Washington, DC, 4-5 October 1999*, Amsterdam, pp. 116-134.
2. Chervyakova A.N. and Sveshnikov A.V. Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing, *Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"*, Moscow, 2007, pp. 267-272.

Journal "Information Technologies and Systems" that is a merger of two academic journals with a long history – Control Systems and Computers journal ISSN (Print) 2706-8145, ISSN (Online) 2706-8153 (published since 1972) and Cybernetics and Computer Engineering journal ISSN (Print) – 2663-2578, ISSN (Online) – 2663-2586 (published since 1965). The organization responsible for publishing the journal is Institute of Information Technologies and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine.

The journal publishes original scientific and review papers about fundamental and applied research results of informatics and information technologies, intelligent control and systems, methods and means of information technology support of knowledge, application of the mentioned technologies in various fields of life. Number of Issues is 6 per year. Currently, the journal does not charge any fees to the authors from submission to publication. The papers are an Open Access under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Журнал «Інформаційні технології та системи» є результатом об'єднання двох академічних журналів з багаторічною історією – журналу «Системи керування та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) 2706-8145, ISSN (онлайн) 2706-8153 (видавався з 1972 року) та журналу «Кібернетика та обчислювальна техніка» ISSN (друковане видання) – 2663-2578, ISSN (онлайн) – 2663-2586 (видавався з 1965 року). Організацією, відповідальною за видання журналу, є Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України.

Журнал публікує оригінальні наукові та оглядові статті про фундаментальні та прикладні результати досліджень інформатики та інформаційних технологій, інтелектуального керування та систем, методів та засобів інформаційно-технологічної підтримки знань, застосування згаданих технологій у різних сферах життя. Кількість випусків – 6 на рік. Наразі журнал не стягує жодних гонорарів з авторів від моменту подання до публікації. Статті знаходяться у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0.





ISSN 3083-6573 INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS 2026, № 1. 1-82