
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191>



УДК 004.3.621.372

Применение методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий

А. А. Двилянский¹ ✉

¹ МИРЭА – Российский технологический университет
пр-т Вернадского, д. 78, г. Москва 119454, Российская Федерация

✉ e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Резюме

Цель исследования заключается в обосновании возможности использования методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов, связанных с оценкой функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий, вызывающих функциональное поражение микроэлектронной компонентой базы средств обработки информации (маршрутизаторов, средств управления, вычислительной техники и мониторинга) критической информационной инфраструктуры.

Методы. Используются системный подход для моделирования процессов, а также методы тензорного и кластерного анализа в рамках оценки функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных воздействий. Интеграция указанных подходов позволяет оптимизировать параметры сетей и узлов связи, а также повысить их устойчивость к неблагоприятным деструктивным воздействиям.

Результаты. Разработана математическая модель для описания состояния критически важной информационной инфраструктуры, базирующаяся на принципах тензорного и кластерного анализа, а также на иерархической процедуре «деградации критической информационной инфраструктуры поглощением» в условиях деструктивного электромагнитного воздействия. Предложенная модель предназначена для формирования и внедрения решающих правил, направленных на обеспечение устойчивости функционирования критически важных информационных систем.

Заключение. На основании проведенного исследования доказана возможность применения тензорного и кластерного анализа к моделированию процессов, связанных с оценкой функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры, находящихся в условиях деструктивных электромагнитных воздействий и иерархической процедуры «деградации критической информационной инфраструктуры поглощением» с формулировкой и выполнением решающих правил в ходе исследуемого процесса, что позволит в последующем применять разработанные модели и методы для повышения защищенности элементов объектов и критической информационной инфраструктуры от различных внешних деструктивных электромагнитных воздействий.

© Двилянский А. А., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(4):175–191

Ключевые слова: сети и узлы связи; критическая информационная инфраструктура; тензорная топология; симплекс; комплекс; полиэдральная структура; кластерный анализ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Двилянский А. А. Применение методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 175–191. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191)

Поступила в редакцию 16.10.2025

Подписана в печать 15.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Application of tensor methodology and cluster analysis in modeling processes related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under destructive electromagnetic impacts

Alexey A. Dvilianskiy¹ ✉

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation

✉ e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Abstract

The purpose of the research is to substantiate the possibility of using the tensor and cluster analysis methodology to simulate the processes associated with the assessment of the functional state of critical information infrastructure (CII) objects in conditions of destructive electro-magnetic influences that cause functional damage to the microelectronic component of the information processing tools (routers, controls, computer equipment and monitoring) critical information infrastructure.

Methods. A systematic approach was used to model processes, as well as methods of tensor and cluster analysis in the framework of assessing the functional state of objects of critical information infrastructure in conditions of destructive effects. The integration of these approaches makes it possible to optimize the parameters of networks and communication nodes, as well as to increase their resistance to non-smooth destructive effects.

Results. A mathematical model has been developed to describe the state of the critical information infrastructure, based on the principles of tensor and cluster analysis, as well as on the hierarchical procedure for "degradation of the critical information infrastructure by watering" under conditions of destructive electromagnetic exposure. The proposed model is intended for the formation and implementation of decisive rules aimed at ensuring the stable functioning of critical information systems.

Conclusion. Based on the study, the possibility of applying tensor and cluster analysis to process modeling was proved related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under conditions of destructive electromagnetic influences and the hierarchical procedure of "degradation of critical information infrastructure by absorption" with the formulation and implementation of decisive rules during the investigated process, that will make it possible to subsequently apply the developed models and methods to increase protection of object elements and critical information infrastructure from individual external destructive electromagnetic effects.

Keywords: *networks and communication nodes; critical information infrastructure; tensor topology; simplex; complex; polyhedral structure; cluster analysis.*

Conflict of interest: *The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dvilianskiy A.A. Application of tensor methodology and cluster analysis in modeling processes related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under destructive electromagnetic impacts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):175–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191>

Received 16.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Формальное описание состояния критической информационной инфраструктуры и её объектов при деструктивном электромагнитном воздействии с использованием математических методов может быть получено путем формирования полной или хотя бы достоверной группы состояний системы с учётом множества качественных информационных параметров элементов управления информационным процессом и процессом защиты с определением полной совокупности состояний, в которых может находиться система, а также связи между ними, что позволит повысить достоверность результатов данной оценки, включающее:

- определения понятия «состояние объектов», а также причины и события, вызывающие его изменение [1];

- классификацию состояний, понятие степени их различимости;

- обоснование конечности множества состояний системы и ее элементов [2].

На настоящий момент существует множество определений понятия «состояние» [3]:

- состояние как понятие, обозначающее множество устойчивых (стабильных) значений переменных параметров (свойств) конкретного объекта. Состояние устойчиво до тех пор, пока над объектом не будет произведено действие; если над объектом будет произведено некоторое действие, его состояние может измениться. Последовательная смена состояний объекта называется процессом;

- состояние как абстрактный термин и категория научного познания, характеризующая способность движущейся материи к проявлению в различных формах с присущими им существенными свойствами и отношениями природных объектов и систем, – качественная и количественная характеристика множества их функциональных и интегративных реальных и потенциальных возможностей, множества их признаков, параметров в пространстве и времени.

Что касается понятия совокупности состояний объектов КИИ, находящихся в условиях деструктивных воздействий, то здесь необходимо в дополнение ко всему дифференцировать объекты на

модули, входящие в них, изучить отношения между ними, общесистемные, внутренние и внешние факторы, в рамках исследуемой задачи – деструктивное воздействие, влияющее на её функциональное состояние [3]. Если в модуле выделить часть его структуры, то ни эта часть, ни оставшиеся части не могут самостоятельно реализовать некоторую завершённую информационную функцию. Каждый модуль вступает в отношения с другими модулями через открытые интерфейсы, определяемые на всех уровнях информационного взаимодействия.

Материалы и методы

Математическая модель состояния информационной системы, находящейся под деструктивным воздействием

Каждый ресурс информационной системы (ИС) (информационно-вычислительные комплексы (ИВК), сети и системы, средства и системы связи и передачи данных (СПД), системы управления (СУ)) в любой момент времени t_v^H характеризуется *состоянием*, для которого известен способ оценки его влияния на целостность информации через живучесть конструктивных элементов и должно существовать активное действие – любая активность (атака) противника, изменяющая поведение (состояние) наблюдаемого (контролируемого) объекта или какого-либо ресурса (КИИ).

Таким образом, должен существовать способ определения времени данного воздействия, его характеристик, а также объекта, производившего воздействие.

Под *поведением объекта* понимается реально наблюдаемое состояние наблюдаемого (контролируемого) объекта во времени, а под состоянием – множество состояний системы, в которых невозможно нарушение штатного функционирования, целостности и/или доступности ресурсов ИС (КИИ), что предусматривает отсутствие материального ущерба защищаемой системы [4].

Состояние ресурса оценивается как список объектов (модулей), имеющих доступ к ресурсу в данный момент времени и количественной оценки загрузки ресурса [5]. Информационная система (КИИ) представляет собой множество объектов (узлов): $O = (O_1, \dots, O_2, O_i, \dots, O_{i+1}, O_{i+q})$, распределённых по $n + k$ уровням иерархии с заданным бинарным отношением подчинённости. Объекты (узлы) O_1, \dots, O_{i+1} , распределённые по (n) уровням иерархии, являются органами управления (ОУ), генерирующими либо транслирующими актуальную информацию в узлы низшего уровня. Объекты (узлы) O_{i+1}, \dots, O_{i+q} низшего n -го уровня иерархии являются ОУ, реализующими управление на основе непосредственного применения, имеющихся в их распоряжении средств активного противодействия внешним воздействиям (рис. 1).

где \succ – символ строгого иерархического подчинения объектов ${}_{n+k}O_{i+q}$ КИИ; $OO_i = OO_i^\uparrow \cup OO_i^\downarrow$ (${}_{n+k}O_{i+q} \in O$) – множество ближайших соседей как объединение всех узлов вышестоящих и нижестоящих соседей, что обеспечивает формирование централизованной структуры. Отметим, что подсистемы низшего уровня $n+k$ могут иметь свои локальные цели, которые практически всегда совпадают с общей целью управления; $OO_i^\downarrow = {}_{n+k}O_{i+q} \in O | \exists \{({}_nO_i, {}_{n+k}O_{i+q}) \in E\}$ – множество нижестоящих ближайших соседей; для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го узла существует хотя бы одно ребро, соединяющее нижний и верхний уровни ($n, n+k$) множества E ;

$OO_i^\uparrow = {}_{n+k}O_{i+q} \in O | \exists \{({}_nO_i, {}_{n+k}O_{i+q}) \in E\}$ – множество вышестоящих ближайших соседей, для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го узла существует хотя бы одно ребро, соединяющее верхний и нижний уровни ($n, n+k$) множества E .

Функционирование КИИ включает прием и передачу информации в соответствии с уровнями иерархии системы: информация от управляющей подсистемы с управляющим процессом F называется управляющими воздействиями, а информация ${}_{n+k}x_{i+q}$, передаваемая от ${}_{n+k}O_{i+q}$ уровня n к ${}_{n+k}O_{i+q}$ уровня $n+k$, является критически важной информацией [6].

$${}_1f_1 \subset F, {}_1f_2 \subset F, {}_nf_i \subset F, {}_{n+k}f_{i+q} \subset F, {}_{n+k}f_{i+q} \neq \emptyset, \quad (4)$$

$$\bigcup_{i=1}^N {}_{n+k}f_{i+q} = F, n, i = 1, \overline{N},$$

относится к полностью упорядоченным подмножествам объектов:

$$\begin{aligned} {}_1F_{i+1} &= ({}_1f_1, \dots, {}_1f_2, \dots, {}_1f_{i+1}); \\ {}_2F_{i+1} &= ({}_2f_1, \dots, {}_2f_2, \dots, {}_2f_{i+1}); \end{aligned} \quad (5)$$

.....

$${}_{n+k}F_{i+1} = ({}_{n+k}f_1, \dots, {}_{n+k}f_2, \dots, {}_{n+k}f_{i+q}).$$

Последовательное выполнение функций $i+q$ -го подмножества функций формирует команду для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го ОУ:

$$\begin{aligned} {}_1f_1: (J_1, \dots, {}_1f_2: (J_1), \dots, ({}_1f_i: (J_1)), \dots), \dots) &\rightarrow {}_1x_{i+1} \\ {}_2f_1: (J_2, \dots, {}_2f_2: (J_2), \dots, ({}_2f_i: (J_2)), \dots), \dots) &\rightarrow {}_2x_{i+1} \end{aligned} \quad (6)$$

.....
.....

$${}_{n+k}f_{i+q}: (J_{n+k}, \dots, {}_1f_{n+k}: (J_{n+k}), \dots, ({}_{n+k}f_{i+q}: (J_{n+k})), \dots), \dots) \rightarrow {}_{n+k}x_{i+q}$$

где J_i – информация о состоянии ОУ, на основании которой разрабатывается актуальная информация для подчиненных объектов (узлов) уровня; ${}_{n+k}x_{i+q}$ – актуальная информация для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го ОУ.

В рамках моделирования оценки функционального состояния объектов КИИ в условиях деструктивных воздействий применим подход, предполагающий описание состояний системы с помощью тензорной теории построения метасистем. При построении модели полагаем, что два объекта (узла) системы имеют однонаправленную либо взаимную связь, если они достижимы друг для друга [7].

Для дальнейшего описания состояния объектов и системы в целом (КИИ), находящейся в условиях деструктивных воздействий, введем следующие понятия:

– *объекты системы*, в которой может быть несколько объектов каждого k -го типа описываются *множеством элементов*, т. е. [0]:

$$\tilde{O} = (\tilde{O}_k^i | k \in N^i, i \in \overline{1, N_k}), \quad (7)$$

где \tilde{O}_k^i – собственное подмножество множества \tilde{O} объектов k -го типа; N^i – множество индексов типов объектов; i – номер объекта в подмножестве объектов k -го типа; N_k – количество объектов k -го типа.

– *свойства объекта* $\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k)$ k -го типа определяются множеством :

$$\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i) = (\tilde{\Phi}_{k,r} | k \in N^i, r \in R(k), \tilde{F}), \quad (8)$$

где $\tilde{\Phi}_{k,r}$ – r -е свойство объекта k -го типа; $R(k)$ – множество обозначений свойств объектов k -го типа; \tilde{F} – совокупность физических характеристик модулей (объектов);

– *отношения* между элементами КИИ определяются множеством:

$$\tilde{\Theta} = (\tilde{\Theta}_q \{ \tilde{O}_\xi | \xi \in \xi^* \} | q \in Q), \quad (9)$$

где $\tilde{\Theta}_q$ – отношение из числа допустимых отношений, заданных перечнем Q ; \tilde{O}_ξ – собственное подмножество объектов множества \tilde{O} , между которыми установлено отношение $\tilde{\Theta}_q$; ξ – список номеров объектов, объединяемых отношением $\tilde{\Theta}_q$; ξ^* – множество всех возможных списков.

При моделировании состояний модулей КИИ при деструктивных воздействиях основной проблемой является вопрос появления большого количества различных комбинаций пораженных и непораженных элементов – элементарные события в этой ситуации связаны логическим соотношением (идемпотентность дизъюнкции) $A_i \vee \bar{A}_i = I$, а все комбинации при деструктивном воздействии учтены сложным событием:

$$\bigwedge_q \bar{A}_j \bigwedge_{N_k - q} A_j, \quad (10)$$

где $0 \leq q \leq N_k$ – пораженные элементы, а $(N_k - q)$ – непораженные элементы.

В силу несовместности таких комбинаций событий справедливо равенство:

$$\bigvee_{q=0}^{q=N_k} \left(\bigwedge_q \bar{A}_j \bigwedge_{N_k - q} A_j \right) = I. \quad (11)$$

«Инфраструктурная механика модуля» КИИ, как указано в [2], может быть представлена в двух режимах – статичном и динамичном. В статичном режиме функционирование (*Static mode of functioning, SMF*) КИИ происходит при устоявшейся инфраструктуре и

описывается системой дифференциальных уравнений:

$$SMF = \begin{cases} \frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} = 0, \\ \frac{dSYS(\tilde{\Theta})}{dt} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $\frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} = 0$ – условие неизменности

во времени системных характеристик на инфраструктурном уровне, а $N_{kS}(\tilde{O}_k^i)$ – количество объектов (модулей) КИИ в сегменте S ; $SYS(\tilde{\Theta})$ – система межобъектных взаимосвязей на уровне межсубъектного взаимодействия.

Система модулей объекта перейдет в динамичный режим, как только изменится системная характеристика – $\frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} \neq 0$. При этом выражение (12) приобретает вид $SMF = \left\{ \frac{dSYS(\tilde{\Theta})}{dt} \neq 0, \right.$ определяющий переход состояния

объекта КИИ в режим частичного поражения его элементов ЭМИ.

Таким образом, процесс деструктивного воздействия имеет двухсторонний (двунаправленный) характер: нападающая сторона (противник) старается обеспечить (создать) максимально возможное поражение до числа N_k , а работы по ликвидации последствий проводятся с $N_k(1 - P_S)$ выявленными элементами КИИ, т. е. при $P_S \rightarrow 0$ $N_k(1 - P) \rightarrow N_k$, что соответствует отсутствию какой-либо защиты КИИ. Таким образом, состояние P_S КИИ в условиях воздействия ЭМИ в любой момент времени может быть представлено множествами свойств $\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i)$ объектов (модулей) \tilde{O}_k^i , множествами отношений $\tilde{\Theta}$ модулей системы, определённых множествами информационных технологий, их свойств, используемых в КИИ в следующем виде:

$$P_S \equiv \left\{ \left(SMF \left| \frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} \neq 0 \right. \right), \tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i), \tilde{\Theta} \right\}, \quad (13)$$

где $M_{N_k}[q]$ – количественная оценка пораженных ЭМИ элементов КИИ определяется следующим выражением:

$$M_{N_k}[q] = \sum_{q=0}^{N_k} q f(q, N_k) \cong N_k P_S (1 - P_S), \quad (14)$$

$f(q, N_k)$ – есть вероятность появления любой комбинации пораженных и непораженных элементов N_k при $0 \leq f(q) < 1$, $N_k < \infty$.

Величина P_S связана с любыми мерами по повышению состояния живучести элементов N_k , начиная от внешней охраны, организационных мер по соблюдению контролируемой зоны (КЗ) до установки различных защитных средств.

Главное ограничение рассматриваемой модели состоит в предположении равновероятности поражения и сохранения работоспособности элементов КИИ при воздействии ЭМИ с реализацией для наихудшего случая [9].

Иерархическая механика «деградации КИИ поглощением» при воздействии ЭМИ

Исследуемая система управления (СУ) (рис. 2) представлена как много-

уровневая структура (дерево) с коэффициентом ветвления 2 и общим количеством узлов – 13 (каждый уровень дерева делится на 3 ветви). Суть процедуры «деградации КИИ поглощением» в условиях воздействия ЭМИ заключается в том, что процесс взаимодействия КИИ и внешней среды представляется путем задания связанных множеств узлов различных уровней иерархии (узлы

источники, транзитные узлы, узлы потребители), множеств поглощаемых объектов в соответствии с иерархией связей в системе и деструктивным воздействием. Критически важная информация поступает от верхнего уровня к нижнему, через промежуточный уровень иерархии и распределяется в соответствии с существующими связями между объектами [10].

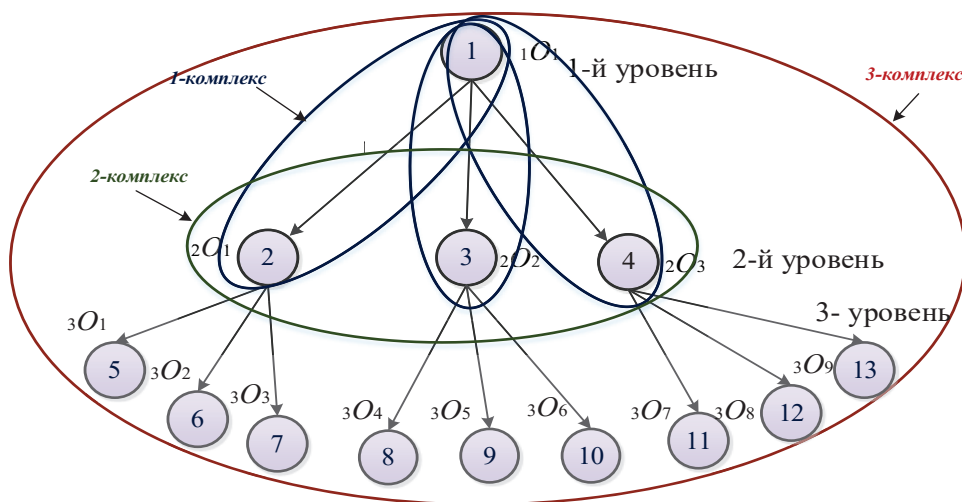


Рис. 2. Исследуемый граф критической информационной инфраструктуры, находящейся под воздействием ЭМИ с учетом иерархии цепей пересечений (граф G1)

Fig. 2. The studied graph of critical information infrastructure under the influence of EMI, taking into account the hierarchy of intersection chains (graph G1)

Таким образом, КИИ представляется как пара неупорядоченных множеств – *множеством переменных-параметров* (объектов КИИ, связей между ними и деструктивными воздействиями) и *множеством отношений*, связывающих значения этих переменных и заключающихся в последовательном определении набора объектов при поражении объектов различного уровня иерархии и поглощении подчиненных им объектов [11]. Ограничимся комбинацией набора

объектов при поражении от 1 до 3-х объектов 2-го уровня КИИ ($2O_1 \dots 2O_3$) с одновременным поражением от 1 до 9 объектов 3-го уровня ($3O_1 \dots 3O_9$) с последующим представлением закона распределения вероятности и количества информационных потерь при деструктивном воздействии¹. Комбинации «поглощений» объектом $1O_1$ объектов 2-го ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) и 3-го уровней иерархии ($3O_1 \dots 3O_9$) [12] представлена ниже (рис. 3).

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023615974 Рос. Федерация. Вычислитель оптимальной маршрутизации информационных потоков

при деструктивных воздействиях на телекоммуникационные сети / А. А. Двилянский и [др.]. № 2023614758; заявл. 22.11.19; опублик. 21.03.23.

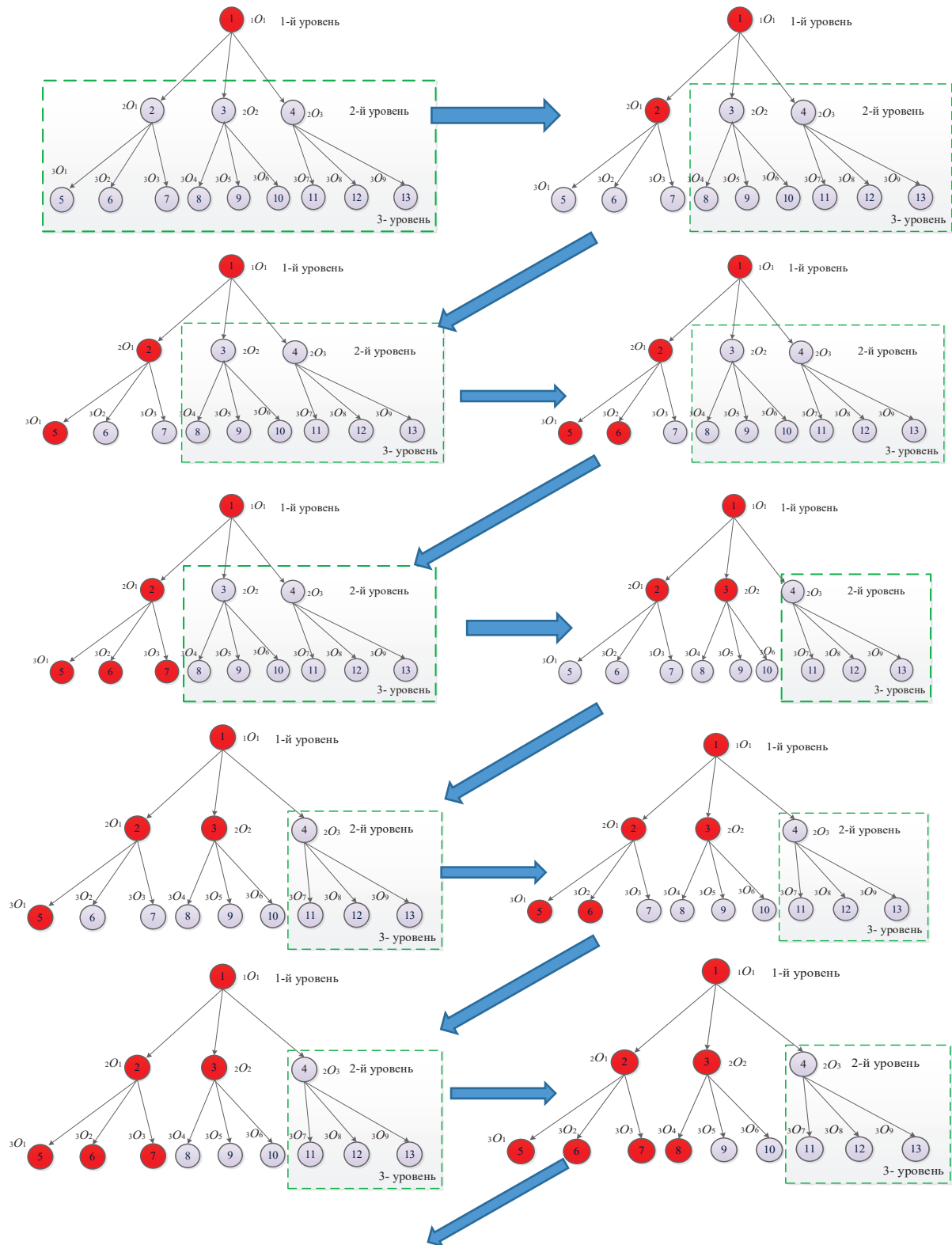


Рис. 3. Комбинации «поглощений» объектом $1O_1$ объектов 2-го ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) 3 и 3-го уровней иерархии ($3O_1 \dots 3O_9$) (окончание см. на с. 185)

Fig. 3. Combinations of "absorptions" by an object $1O_1$ objects 2nd ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) and the 3rd level of the hierarchy ($3O_1 \dots 3O_9$) (for the end, see p. 185)

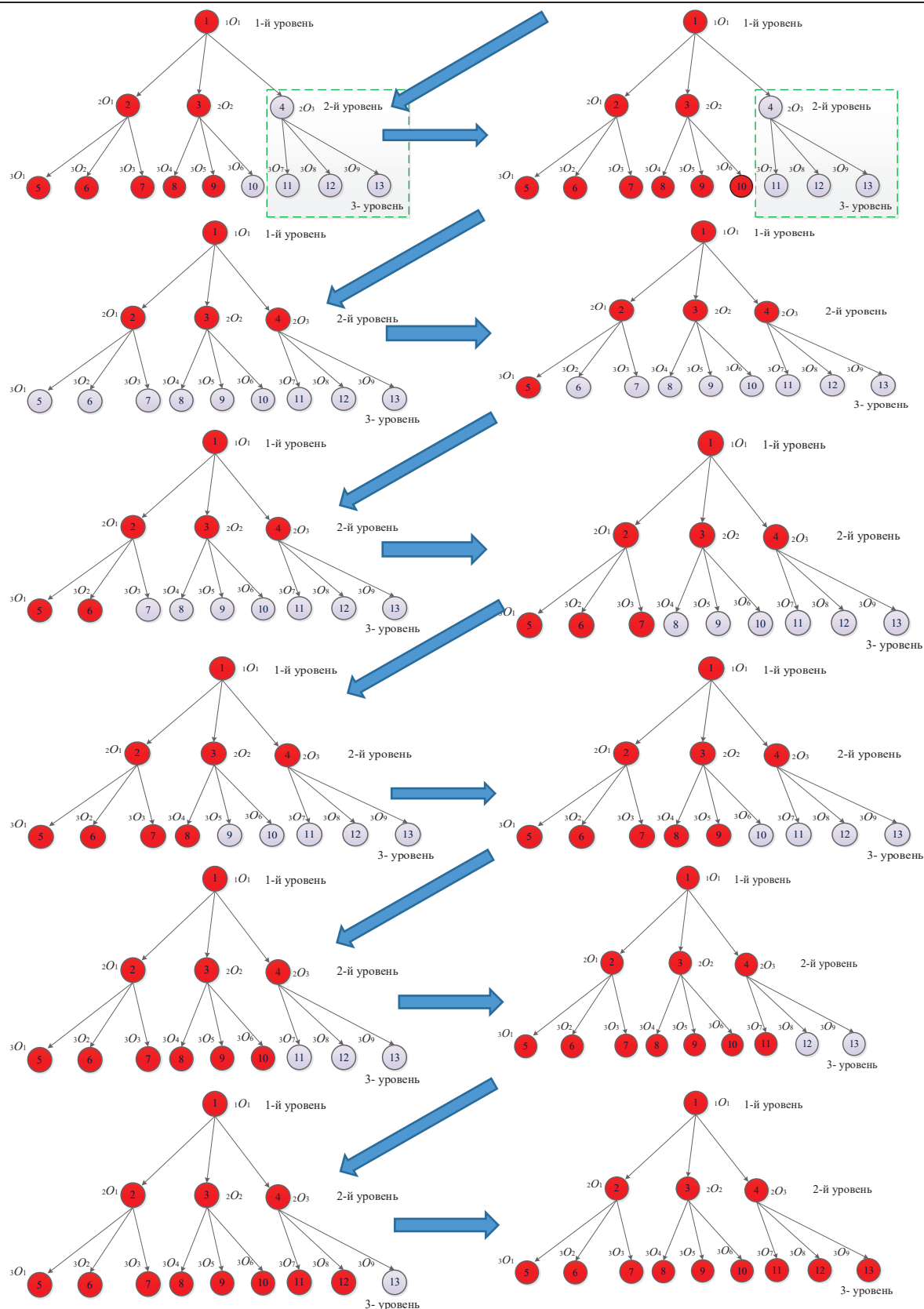


Рис. 3. Окончание (начало см. на с. 184)

Fig. 3. Ending (see beginning on p. 184)

Результаты и их обсуждение

Предложен ряд решающих правила для оценки «деградации КИИ поглощением»:

Правило 1. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов

$$\text{if } \Psi_{i+q} \in U \wedge \left[{}_{n+k}O_{i+q} = O_1^1 \wedge ({}_2O_{i+q} \wedge {}_3O_{i+q}) \right] \Rightarrow E_G = 1. \quad (15)$$

Правило 2. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту

графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту 1-го уровня, то потери равны 1 в любых сочетаниях с деградирующими узлами 2-го и 3-го уровней [13]:

2-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня¹:

$$\text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge ({}_{n+k}O_{i+q} = {}_2O_{i+q}) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2O_{i+q} \mid P({}_2O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2O_{i+q}}. \quad (16)$$

Правило 3. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объектам

3-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 3, деленных на общее количество узлов 3 уровня [14]:

$$\text{if } \Psi_{i+q} \in U \wedge ({}_{n+k}O_{i+q} = {}_3O_{i+q}) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_3O_{i+q} \mid P({}_3O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_3O_{i+q}}. \quad (17)$$

Правило 4. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объектам 2-го и 3-го уровня, при этом узлы 3-го

уровня находятся в подчиненности узлам 2-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня [15]:

$$\text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge ({}_{n+k}O_{i+q} = {}_2O_{i+q}) \wedge ({}_2O_{i+q} \succ {}_3O_{i+q}) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2O_{i+q} \mid P({}_2O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2O_{i+q}}. \quad (18)$$

Правило 5. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту

2-го и 3-го уровня, при этом деградирующие узлы 3-го уровня не находятся в подчиненности деградирующим узлам 2-го уровня, потери равны сумме

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2023681706 Рос. Федерация. Реализация квадратурных цифровых фильтров, функциони-

рующих в условиях деструктивных электромагнитных воздействий / А. А. Двилянский [и др.]. № 2023662602; заявл. 09.10.23; опублик. 17.10.23.

количества деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня и количество

деградирующих узлов 3 уровня, деленных на общее количество узлов 3 уровня [16]:

$$\begin{aligned} & \text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge \left[\left({}_{n+k}O_{i+q} = {}_2O_{i+q} \right) \wedge \left({}_{n+k}O_{i+q} = {}_3O_{i+q} \right) \right] \Rightarrow \\ & \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2O_{i+q} \mid P({}_2O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2O_{i+q}} + \frac{\left\{ {}_3O_{i+q} \mid P({}_3O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_3O_{i+q}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для получения набора показателей, характеризующих численное значение деградации (потерь) объектов КИИ при деструктивном воздействии, проводится классификации неоднородных статистических совокупностей [17]:

1. На первом этапе генерируется множество случайных чисел, однозначно соответствующее (принадлежащее) множеству объектов (узлов) КИИ:

$$\Psi = \{ {}_{n+k}O_{i+q} \mid 1 \leq {}_{n+k}O_{i+q} \leq O \} \quad (20)$$

где Ψ – множество чисел, принадлежащих отрезку [1-О (выражение 1)] который соответствует количеству объектов КИИ.

Поражения объекта КИИ определяется следующим условием [18]:

$$\text{Если } \forall {}_{n+k}O_{i+q} \exists \Psi_i \rightarrow \theta_i = \text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge \left({}_{n+k}O_{i+q} = {}_2O_{i+q} \right) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2O_{i+q} \mid P({}_2O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2O_{i+q}}.$$

$$\text{Если } \forall {}_{n+k}O_{i+q} \nexists \Psi_i \rightarrow \theta_i = 0. \quad (21)$$

Если для всех (для любого) узлов существует случайное число из заданного множества, переменная Θ_i принимает значение 1, в противном случае 0. Если переменная Θ_i принимает значение 1, то выполняется суммирование всех переменных с последующим произведением на величину единичных потерь информации. Завершением первого этапа является вычисление потерь информации для каждой генерации случайных чисел:

$$\text{Если } \theta_i = 1 \rightarrow E = E_i \sum_{i=1}^{\Psi} \theta_i. \quad (22)$$

2. На втором этапе, в соответствии с отношением эквивалентности, выполня-

ется разбиение всего множества данных E_i на непересекающиеся классы, в каждом из которых результаты моделирования признаются тождественными, неразличимыми, а данные из разных классов считаются нетождественными выполним с помощью кластеризации данного множества:

$$M_{l,i,j} = \sum_{l=1}^m |E_i^l - E_j^l|, \quad (23)$$

где E_i^l – значение l -го признака у i -го объекта, $l = \overline{1, m}$; $i, j = \overline{1, n}$; \bar{x} – вектор-столбец значений всех признаков на i -м объекте; 1 – наличие свойства, 0 – отсутствие:

$$M_{l,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } |E_i^l - E_j^l| \leq \varepsilon_i, \\ 0, & \text{в любом другом случае.} \end{cases} \quad (24)$$

После получения непересекающихся классов E_i (отношение эквивалентности) все информационные сущности внутри найденного класса считаем тождественными, а разных классов – нет.

Выводы

В статье представлена возможность математического описания состояния КИИ, находящейся под деструктивным воздействием с помощью тензорного и кластерного анализа с последующей

иерархической механикой процедуры «деградации КИИ поглощением» при воздействии ЭМИ с формулировкой и применением решающих правил в ходе данного процесса.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку гибких методов, которые должны обеспечить требуемые показатели устойчивости сложных организационно-технических систем при воздействии деструктивных электромагнитных излучений, что и отражает развитие идеи комплексности решения исследуемой проблемы.

Список литературы

1. Максимова Е. А. Методы выявления и идентификации источников деструктивных воздействий инфраструктурного генеза // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 2. С. 86–99.
2. Максимова Е. А. Модель состояний субъектов критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях в статичном режиме // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7, № 3. С. 65–72.
3. Двилянский А. А., Иванов В. А. Методология оценки комплексной защищенности объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений: монография. Орёл: Академия ФСО России, 2018. 230 с.
4. Роль и место электромагнитного оружия при реализации наступательной стратегии в информационной специальной операции / В. А. Иванов, А. А. Двилянский, И. В. Иванов, Е. А. Гондаренко [и др.] // Техника средств связи. 2022. № 3 (159). С. 62–73.
5. Сундеев П. В. Кластерная модель защиты распределенного реестра // Вопросы кибербезопасности. 2025. № 4 (68). С. 2–8. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2025-4-2-8>
6. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in IoT Core Networks / O. Lemeshko, J. Papan, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, P. Segec // Sensors (Basel). 2021. N 21(11). P. 3934. <https://doi.org/10.3390/s21113934>
7. Устойчивость технологических процессов в аспекте безопасности критической информационной инфраструктуры / Г. П. Гавдан, А. Н. Вавичкин, В. Г. Иваненко, Ю. Д. Кулешова, Э. П. Рыбалко // Безопасность информационных технологий = IT Security. 2023. Т. 30, № 2. С. 32–52. <https://doi.org/10.26583/bit.2023.2.02>

8. Математическая модель состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля при их поражении электромагнитным импульсом / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, М. Ю. Рытов, Е. А. Гондаренко, Г. В. Гурьев // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 2. С. 102–109.

9. Двилянский А. А., Иванов В. А., Конышев М. Ю. Эргооптимизация системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивного электромагнитного воздействия // Эргоди-
зайн. 2021. № 12. С. 118–125.

10. Вайсфельд М. Объектно ориентированный подход. СПб.: Питер, 2020. 256 с.

11. Современные методы оптимизации и особенности их применения / С. М. Беке-
тов, Д. А. Зубкова, А. М. Гинцяк, Ж. В. Бурлуцкая, С. Г. Редько // Russian Technological
Journal. 2025. Т. 13, № 4. С. 78–94.

12. Распределенное информационное пространство как ассоциативная среда инфо-
коммуникационных сетевых структур / Н. Р. Юсупбеков, Ш. М. Гулямов, В. Б. Тарасов,
Н. Б. Усманова, М. Ю. Дощанова // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 3.
С. 20–29.

13. Тамм Ю. А. Оптимизация размещения новых магистральных узловых станций
при структурном расширении действующей инфокоммуникационной сети // Проекти-
рование и технология электронных средств. 2019. № 2. С. 20–24.

14. Двилянский А. А. Математический метод моделирования ущерба, наносимого
объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии деструктив-
ных электромагнитных излучений // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 8.
С. 45–51.

15. Двилянский А. А. Численный метод оптимизации экономических затрат в рам-
ках обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информацион-
ной инфраструктуры в условиях воздействия электромагнитных импульсов // Промыш-
ленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54–59.

16. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функциониро-
вания системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специаль-
ного назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы
управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152–189.

17. A way to ensure the Reliability of Information Portals of Regional Executive Author-
ities / M. Y. Rytov, V. T. Eremenko, A. A. Dvilyanskiy, A. P. Gorlov, O. V. Tretyakov,
M. L. Gulak // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.
2019. Vol. 8, Is. 6S3. P. 614–617

18. Методика обоснования требуемого уровня стойкости оборудования сетей связи
в условиях внешних деструктивных воздействий / С. С. Семенов, А. С. Белов, В. С. Во-
ловилов, А. В. Скубьев // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 33–
53. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10102>

References

1. Maksimova E.A. Methods of identification and identification of sources of destructive impacts of infrastructural genesis. *Elektronnyi setevoi politematicheskii zhurnal «Nauchnye trudy KubGTU» = Online Journal of Political Science Scientific "Papers of Kuban State Technological University"*. 2022;(2):86–99. (In Russ.)
2. Maksimova E.A. Model of states of subjects of critical information infrastructure under destructive influences in a static mode. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communications*. 2021;7(3):65–72. (In Russ.)
3. Dviliansky A.A., Ivanov V.A. Methodology for assessing the integrated protection of infocommunication system facilities from the effects of destructive electromagnetic radiation. Orel: Akademiya FSO Rossii; 2018. 230 p. (In Russ.)
4. Ivanov V.A., Dviliansky A.A., Ivanov I.V., Gondarenko E.A., et al. The role and place of electromagnetic weapons in the implementation of an offensive strategy in an information special operation. *Tekhnika sredstv svyazi = Means of Communication Equipmen.* 2022;(3):62–73. (In Russ.)
5. Sundeev P.V. Cluster model of distributed registry protection. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*. 2025;(4):2–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2025-4-2-8>
6. Lemeshko O., Papan J., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Segec P. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in IoT Core Networks. *Sensors (Basel)*. 2021;(21):3934. <https://doi.org/10.3390/s21113934>
7. Gavdan G.P., Vavichkin A.N., Ivanenko V.G., Kuleshova Yu.D., Rybalko E.P. Sustainability of technological processes in the aspect of security of critical information infrastructure. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = IT Security = Information Technology Security = IT Security*. 2023;30(2):32–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/bit.2023.2.02>
8. Dviliansky A.A., Ivanov V.A., Rytov M.Yu., E.A. Gondarenko, Guryev G.V. Mathematical model of the state of networks and communication nodes in the algebraic space of a tensor field when they are affected by an electromagnetic pulse. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intellectual Systems in Production*. 2023;21(2):102–109. (In Russ.)
9. Dviliansky A.A., Ivanov V.A., Konyshev M.Yu. Ergooptimization of the system for ensuring the functional stability of critical information infrastructure facilities under conditions of destructive electromagnetic influence. *Ergodizain = Ergodesign*. 2021;(12):118–125. (In Russ.)
10. Weisfeld M. The object-oriented approach. Saint Petersburg: Piter; 2020. 256 p. (In Russ.)
11. Beketov S.M., Zubkova D.A., Gintsyak A.M., Burlutskaya Zh.V., Redko S.G. Modern optimization methods and features of their application. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):78–94. (In Russ.)

12. Yusupbekov N.R., Gulyamov Sh.M., Tarasov V.B., Usmanova N.B., Doschanova M.Y. Distributed information space as an associative environment of infocommunication network structures. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial ACS and Controllers*. 2019;(3):20–29. (In Russ.)

13. Tamm Yu.A. Optimization of the placement of new backbone hub stations with the structural expansion of the existing infocommunication network. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Devices*. 2019;(2):20–24. (In Russ.)

14. Dviliansky A.A. Mathematical method of modeling damage caused to objects of critical information infrastructure when exposed to destructive electromagnetic radiation. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial ACS and Controllers*. 2019;(8):45–51. (In Russ.)

15. Dviliansky A.A. Numerical method for optimizing economic costs in the framework of ensuring the functional stability of critical information infrastructure facilities under the influence of electromagnetic pulses. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial ACS and controllers*. 2019;(9):54–59. (In Russ.)

16. Odoevsky S.M., Lebedev P.V. Methodology for assessing the stability of the technological management system of a special-purpose infocommunication network with a given topological and functional structure. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2021;(1):152–189. (In Russ.)

17. Rytov M.Y., Egemepko V.T., Dvilyansky A.A., Gorlov A.P., Tretyakov O.V., Gulak M.L. A way to ensure the Reliability of Information Portals of Regional Executive Authorities. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019;8(6S3):614–617.

18. Semenov S.S., Belov A.S., Volovikov V.S., Skubyev A.V. Methodology for substantiating the required level of durability of communication network equipment in conditions of external destructive influences. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2019;(1):33–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10102>

Информация об авторе / Information about the Author

Двилянский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геоинформационных систем, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651

Alexey A. Dvilyansky, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Geoformation Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651