

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-5-119-126

А.В. Боженюк, М.В. Князева, О.В. Косенко, Е.Е. Косенко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Контроль износа оборудования является важной и актуальной задачей, требующей постоянного внимания и мониторинга. Это связано с тем, что износ оборудования может привести к снижению его эффективности его эксплуатации, повышению вероятности возникновения аварий или поломке. Задача замены оборудования является системной производственной задачей, при решении которой необходимо учесть множество факторов, влияющих на эффективность деятельности предприятия. В данной работе предложена концепция решения задачи своевременной замены оборудования с использованием периодических нечетких графов. Периодические нечеткие графовые модели позволяют адекватно отражать виды неопределенности, отражать специфику отношений между моделируемыми объектами, оптимизационные ограничения; решать различные задачи циклического типа, задачи сетевого планирования и управления. В данной работе применение математического аппарата периодических нечетких графов позволило задачу динамического характера, которая зависела от двух временных переменных свести к задаче, зависящей только от времени эксплуатации оборудования. При этом возраст оборудования предложено учитывать при определении коэффициента износа, определяемого степенью принадлежности к тому или иному классу износа. Данный аспект позволил свести поставленную задачу к исследованию износа всего оборудования, участвующего в технологическом процессе и учитывать покупку оборудования бывшего в употреблении (не нового). При определении функции принадлежности возможен учет факторов, которые могут повлиять на решение оптимизационной производственной задачи. Постановка задачи в нечетком виде обеспечивает возможность прогнозирования и планирования деятельности предприятия на будущие повторяющиеся периоды. В статье проведен литературный обзор, с обоснованием актуальности рассмотренной задачи. Рассмотрена задача замены оборудования с учетом динамических составляющих. Для отражения динамики производственного процесса были предложены темпоральные графы. Применение графовой модели обеспечивает наглядность отображения состояния оборудования в процессе его эксплуатации. Применение периодических нечетких графов позволяет задачу замены оборудования упростить за счет сокращения одной временной составляющей и масштабировать классическую динамическую задачу с учетом неопределенных исходных данных.

Производственный процесс; оптимизация; замена оборудования; нечеткость; функция принадлежности; периодический нечеткий граф.

A.V. Bozhenyuk, M.V. Knyazeva, O.V. Kosenko, E.E. Kosenko

USING PERIODIC FUZZY GRAPHS IN PRODUCTION EQUIPMENT CONTROL PROBLEMS

Monitoring equipment wear is an important and urgent task that requires constant attention and monitoring. This is due to the fact that wear and tear on equipment can lead to a decrease in its operating efficiency, an increased likelihood of accidents or breakdown. The task of replacing equipment is a systemic production task, in solving which it is necessary to take into account many

factors that influence the efficiency of the enterprise. This paper proposes a concept for solving the problem of timely replacement of equipment using periodic fuzzy graphs. Periodic fuzzy graph models make it possible to adequately reflect types of uncertainty, reflect the specifics of relationships between modeled objects, and optimization constraints; solve various cyclic problems, network planning and management problems. In this work, the use of the mathematical apparatus of periodic fuzzy graphs allowed a problem of a dynamic nature, which depended on two time variables, to be reduced to a problem that depended only on the operating time of the equipment. At the same time, it is proposed to take into account the age of equipment when determining the wear coefficient, determined by the degree of belonging to a particular wear class. This aspect made it possible to reduce the task to study the wear of all equipment involved in the technological process and consider the purchase of used (not new) equipment. When determining the membership function, it is possible to consider factors that may influence the solution of the optimization production problem. Setting the problem in a fuzzy form makes it possible to forecast and plan the activities of an enterprise for future recurring periods. The article contains a literature review, justifying the relevance of the problem considered. The problem of replacing equipment considering dynamic components is considered. Temporal graphs have been proposed to reflect the dynamics of the production process. The use of a graph model provides a clear display of the state of equipment during its operation. The use of periodic fuzzy graphs allows the problem of replacing equipment to be simplified by reducing one time component and to scale the classical dynamic problem considering uncertain initial data.

Production process; optimization; equipment replacement; fuzzy set; membership function; periodic fuzzy graph.

1. Введение. Организация производства предполагает скоординированное выполнение различных процессов, а именно: планирование операций, оперативное планирование и контроль. Обычно производство продукции состоит из процесса подготовки производства, из производственного процесса и процесса организации сбыта. При этом производственный процесс включает в себя множество различных операций, в том числе связанных с управлением технологического оборудования, техническим обслуживанием. При этом правильная организация производства способствует оптимизации рабочего процесса и, следовательно, повышает эффективность всего производственного процесса. Этого можно достичь за счет внедрения надлежащих систем планирования, составления графиков и контроля.

Эффективно организованная производственная система гарантирует, что каждая задача выполняется вовремя и в рамках бюджета, что приводит к более высокому уровню производительности [1, 2]. Это, в свою очередь, помогает снизить затраты на производство и максимизировать прибыль. Организация производства предполагает координацию и реализацию различных процессов. Однако эти задачи не лишены ограничений. Производственный процесс часто необходимо завершить в определенные сроки, и если эти сроки не соблюдаются, качество продукта может ухудшиться или вообще не быть завершенным. Каждый производственный процесс, чтобы оптимизировать свои производственные циклы, повысить финансовые результаты, должен быть организован в соответствии с различными критериями и подходами.

Во многих публикациях отмечена возрастающая актуальность к задаче оптимизации производственных процессов. В [3–5] отмечена тенденция увеличения сложности серийных производственных линий и связанных с этим производственных затрат в современных отраслях с большими объемами производства. В [6] отмечено, что в последние годы увеличивается турбулентность внешней среды, в которой действуют компании, проявляющейся, в частности, в усилении динамичности рынков и глубоких изменениях в структуре потребительского спроса. Учитывая эти проблемы, в статье рассматриваются два отдельных пути улучшения управления производством: повышение экономической эффективности за счет

оптимизации размера партий и гибкие производственные системы за счет внедрения методов, позволяющих сократить время переналадки и замены оборудования. В [7, 8] рассмотрены системы сборочного производства. При этом авторы акцентируют на возможность объединения в рамках одного производственного процесса двух или более серийных производственных линий. Предложена оптимизационная модель на основе генетических алгоритмов. Отмечается возрастающая размерность данных задач, что накладывает ограничения на применение генетических алгоритмов. В [9] оптимизационная производственная задача определена как многокритериальная. Многоцелевая задача решается для оптимизации двух конфликтующих целей: максимизации производительности и минимизации энергопотребления при общей доступной емкости хранения. Представленные решения представляют собой компромисс между двумя целями, позволяя принимать решения, которые уравнивают максимизацию производительности с экономией энергии при проектировании производственных линий.

В данном контексте в литературе рассматриваются проблемы повышения эффективности и гибкости продукции, элементы, связанные с радикальными изменениями методов управления и технологий производства. Усовершенствование существующих и выработка новых подходов к оценке производственного процесса необходимо в условиях быстро изменяющейся номенклатуры производства. В большинстве подходов оптимизация процессов серийного производства основана на формализации задачи целесообразности замены оборудования в результате его изнашивания или устаревания. Актуальность данного направления рассмотрена в [10–15]. Модели сформулированы на основе стохастического динамического программирования, которые позволяют учесть динамику и неопределенность данной системы. При управлении промышленным производством одной из важнейших проблем является решение вопросов эффективного использования оборудования. В первом разделе рассматривается классическая задача динамического программирования по замене оборудования. Определено, что в классической постановке задача плохо масштабируется и возникают сложности, при учете факторов, влияющих на планирование производства. В данной постановке функция оптимальности зависит от стоимости оборудования и эксплуатационных затрат. Во втором разделе рассмотрена возможность применения нечетких темпоральных графов к решению задачи планирования производства в части замены оборудования. Определено, что при данном подходе задача может быть масштабируема, то есть рассматривается не одно оборудование, а несколько. Параметр – возраст оборудования, может быть комплексно учтен при определении износа оборудования через функцию принадлежности, как и другие параметры, влияющие на работоспособность оборудования. В последнем разделе рассматриваются выводы и будущие направления.

2. Постановка задачи замены оборудования. Машины и оборудование обычно представляют собой наибольшее распределение ресурсов в производственном процессе. Неправильные решения относительно замены оборудования часто могут стоить гораздо больше, чем вся экономия и снижение затрат, достигнутые во всех других областях производства и планирования. С возрастом как частота отказов, так и соответствующие затраты на техническое обслуживание значительно увеличиваются по мере того, как начинается износ и старение компонентов. Принятия оптимальных стратегических решений при планировании производственных процессов позволит обеспечить эффективность и конкурентоспособность производственной системы.

В классической постановке задача замены оборудования определена следующими параметрами [16–18]:

T – возраст оборудования, ($t=0, 1, 2, 3, \dots, n$), где $t=0$ – использование нового оборудования, $t=1$ – использование оборудования возраста одного периода и т.д.;

t_0 – начальный возраст оборудования;

n – продолжительность планового периода;

$r(t)$ – цена продукции, производимой на оборудовании возраста t за расчетный период (год);

$u(t)$ – эксплуатационные затраты за год на оборудование возраста t ;

$s(t)$ – остаточная стоимость оборудования возраста t ;

p_0 – цена нового оборудования.

Возможные управляющие воздействия:

- ♦ сохранить оборудование $r(t) - u(t)$;
- ♦ заменить оборудование (продать имеющееся оборудование и купить новое) $s(t) - p + r(0) - u(0) + F_{n-1}$.

Решение о замене имеющегося оборудования возраста t на новую принимается в том случае, когда доход от нового оборудования больше, чем от старого.

При построении модели задачи замены оборудования принято считать, что решение о замене выносится в начале каждого определенного промежутка эксплуатации (k). Возможные состояния оборудования S_k^t после каждого периода использования – либо его сохранность и продолжение эксплуатации (X^c), либо оборудование подлежит замене (X^z) (рис. 1).

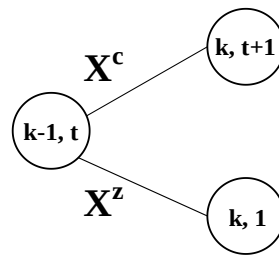


Рис. 1. Схема возможных состояний оборудования

$$S_k^t = \begin{cases} t+1, & \text{если } X^k = X^c \\ t=1, & \text{если } X^k = X^z \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, n$$

S_k^t – состояние оборудования, соответствующее возрасту t .

Критерием оптимальности данной задачи является либо прибыль от эксплуатации оборудования – задача максимизации, либо суммарные затраты на эксплуатацию в течение планируемого периода – задача минимизации. Функция определения суммарного дохода $F_n(t)$ описывается следующим образом [17, 18]:

$$F_n(t) = \max \begin{cases} r(t) - u(t) & \text{– сохранение оборудования } (X^c) \\ s(t) - p + r(0) - u(0) + F_{n-1} & \text{– замена оборудования } (X^z) \end{cases}$$

Тогда схема возможных состояний оборудования в течение некоторого эксплуатационного периода отобразится на графе следующим образом (рис. 2).

Управляющее решение по данному оборудованию определится в следующем виде: ($X^c, X^c, X^z, \dots$), то есть будут даны однозначные рекомендации по сохранению либо замене оборудования без учета допущений и обстоятельств, которые могут влиять на производственный процесс.

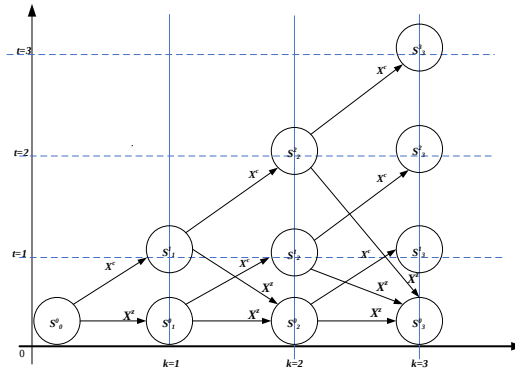


Рис. 2 Схема возможных состояний оборудования в течение некоторого эксплуатационного периода

3. Применение периодических нечетких графов к задаче замены оборудования. Рассмотренная задача относится к задачам динамического программирования. Состояние производственной системы, где объектами выступает оборудование, определяется возрастом оборудования t и фактическим временем использования оборудования k , то есть определяющим параметром является время. В статье [18] отмечено, что более половины авторов считают сетевую модель удобным инструментом для отображения жизненного цикла в производственном процессе. Применение графовой модели обеспечивает наглядность отображения состояния оборудования в процессе его эксплуатации. Состояние элементов данной модели изменяется в соответствии с некоторыми периодами времени. Для отражения динамики процесса на графах были предложены темпоральные графы. Для задачи целесообразности замены оборудования темпоральный граф запишем следующим образом:

$$G = (S_k^t, \{X_k^t\}, T),$$

где множество S_k^t является множеством вершин графа, множество натуральных чисел $t=\{1, 2, \dots, T\}$ определяет дискретное время, а множество $\{X_k^t\}$ задает семейство соответствий, которые отображают вершины S_k^t в моменты времени $t = \overline{1, T}$. Так как в динамической задаче замены оборудования обозначены две переменных, отражающих временной период (t – возраст оборудования; k – время эксплуатации данного оборудования), то определяющим моментом обозначим время k – как момент принятия решения о смене состояния используемого оборудования, либо его продолжения. Семейство соответствий (рис. 2) можно задать в виде:

$$\begin{aligned} X_1(S_0^0) &= \{S_1^0; S_1^1\}; \\ X_2(S_1^0) &= \{S_2^0; S_2^1\}; X_2(S_1^1) = \{S_2^1; S_2^2\}; \\ X_3(S_2^0) &= \{S_3^0; S_3^1\}; X_3(S_2^1) = \{S_3^1; S_3^2\}; \\ X_3(S_2^2) &= \{S_3^2; S_3^3\}; X_3(S_2^1) = \{S_3^0; S_3^2\}; X_3(S_2^2) = \{S_3^0; S_3^3\}. \end{aligned}$$

При принятии решения в момент k существует лишь два варианта: либо оборудование продолжает функционировать, либо его необходимо заменить. При стратегическом планировании производственной деятельности предприятия использование классического инструмента решения задачи замены оборудования не позволит учесть реалии производственного процесса. В современных условиях,

постоянно меняющихся логистических, ресурсных, материальных потоков, четко определить на прогнозный период необходимо ли менять оборудование или при определенных условиях оно может еще проработать – сложно. Необходимы допущения, которые смогут учесть неопределенность параметров задачи при планировании производственной деятельности.

В работах [20, 21] предложен математический аппарат, позволяющий учесть не только модель задачи в виде графа и временные отрезки, но и позволит записать исходные параметры задачи в нечетком виде. Периодический нечеткий граф $\tilde{G} = (S_k^t, \{\tilde{X}_k\}, T)$ определяется как нечеткий ориентированный граф $\tilde{G} = (S_k^t, \tilde{U}_t)$, в котором множество $\tilde{U}_t = \{\mu_t(s_i, s_j)\}$ – нечеткое множество ориентированных ребер в моменты $t=1, T$, а функция μ_t есть функция принадлежности, определяющая степень износа оборудования в момент времени t (рис. 3). Причем, после момента $t = T$ опять наступает время $t = 1$ и период повторяется.

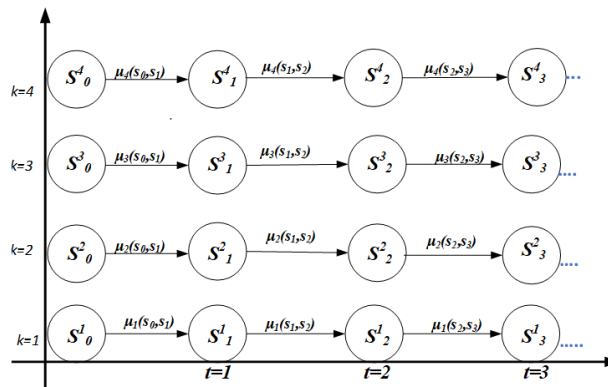


Рис. 3. Схема замены оборудования в серийном производстве

При этом функция принадлежности, определяющая степень износа оборудования, позволяет упростить задачу определения состояния производственного оборудования при организации серийного производства. В работе [17] упоминается, что к вектору управления производственными процессами необходимо добавить такой компонент как возраст устанавливаемого оборудования (не нового), что значительно увеличит размерность задачи. В нечеткой постановке такой параметр как возраст оборудования является излишним, так как $\mu_t(s_i, s_j)$ позволяет эти характеристики учесть. Тем самым, задача, зависящая от двух временных показателей, переходит в задачу так называемых «реперных точек», периодов, когда оборудование с учетом его возраста и состояния проходит оценку на пригодность. В данной постановке учитывается, что на производство может быть приобретено не только новое оборудование, но и оборудование с определенной степенью износа. В качестве управляющего решения будут выданы рекомендации по каждому периоду проверки оборудования на износ. В качестве решения могут быть определены рекомендации в соответствии с периодами использования оборудования, согласно рис. 3:

- ♦ в момент времени $t=1$: $\mu_1(s_0, s_1), \mu_2(s_0, s_1), \mu_3(s_0, s_1), \mu_4(s_0, s_1)$;
- ♦ в момент времени $t=2$: $\mu_1(s_1, s_2), \mu_2(s_1, s_2), \mu_3(s_1, s_2), \mu_4(s_1, s_2)$;
- ♦ в момент времени $t=3$: $\mu_1(s_2, s_3), \mu_2(s_2, s_3), \mu_3(s_2, s_3), \mu_4(s_2, s_3)$;

$$S_k^t = \begin{cases} \mu_t(s_i, s_j) < \delta, & \text{если } X^k = X^c \\ \mu_t(s_i, s_j) \geq \delta, & \text{если } X^k = X^z \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

где δ – пороговое значение степени износа.

В зависимости от пороговых значений степени износа могут быть выданы рекомендации по каждому периоду контроля о необходимости замены оборудования либо его сохранении.

Вывод. Аппарат нечеткой математики, в том числе периодические нечеткие графы, позволили задачу замены оборудования упростить за счет сокращения второй временной составляющей. Данное обстоятельство позволяет рассматривать задачу замены оборудования не для одной, а для комплекса машин, что обеспечивает масштабируемость классической задачи динамического программирования с учетом неопределенных исходных данных.

В дальнейшем, при развитии данной темы планируется проработать математический аппарат определения устойчивости системы для каждого временного периода с учетом их неполноты данных, периодичности, рассмотреть возможность определения стратегии и обоснованность профилактического ремонта.

Подтверждения. Исследование было профинансировано Российским научным фондом, проект № 23-21-00206, <https://rscf.ru/en/project/23-21-00206> / реализовано Южным федеральным университетом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cochran D.S., Arinez J.F., Duda J.W., & Linck J. A decomposition approach for manufacturing system design, *Journal of manufacturing systems*, 2002, pp. 371-389.
2. Maher Rami & Hadidi Amani. Engineering project management planning and scheduling. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2017, 8, pp.140-148.
3. Alkhalefah Hisham & Umer Usama & Abidi Mustafa & Elkaseer Ahmed. Development and Numerical Optimization of a System of Integrated Agents for Serial Production Lines, 2023, pp. 1-21.
4. Xi S., Chen Q., Smith J.M., Mao N., Yu, A., Zhang H. A new method for solving buffer allocation problem in large unbalanced production lines, *Int. J. Prod. Res.*, 2020, pp. 6846-6867.
5. Duan J., Li H., Zhang Q. Multiobjective optimization of buffer capacity allocation in multiproduct unreliable production lines using improved adaptive NSGA-II algorithm, *Kuwait J. Sci.*, 2021, pp. 37-49.
6. Driga Imola & Dura Codruța & Isac Claudia. Possibilities of Increasing Efficiency Within Serial Production Management, *Annals of the University of Petrosani, Economics*, 2010, pp. 125-136.
7. Aboelfotoh Aaya & Süer Gürsel. Selection of Assembly Systems; Assembly Lines vs. Seru Systems, *Procedia Computer Science*, 2019, pp. 351-358.
8. Alkhalefah Hisham & Abu Qudeiri Jaber E. & Umer Usama & Abidi Mustafa & Elkaseer Ahmed. Development of an Efficient Prediction Model for Optimal Design of Serial Production Lines, *IEEE Access*, 2017, pp. 230-233.
9. Sadeghpour Houman & Tavakoli A. & Kazemi Mostafa & Pooya Alireza. A novel approximate dynamic programming approach for constrained equipment replacement problems: A case study, *Advances in Production Engineering & Management*, 2019, pp. 158-182.
10. Fan Wei & Machemehl Randy & Gemar Mason & Brown Leonard. A Stochastic Dynamic Programming Approach for the Equipment Replacement Optimization under Uncertainty, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, Vol. 14, pp. 76-84.
11. Zvipore David & Philimon Nyamugure & Maposa Daniel & Lesaoana Maseka. Application of the Equipment Replacement Dynamic Programming Model in Conveyor Belt Replacement: Case Study of a Gold Mining Company, *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 2005, pp. 1123-1137.
12. Ukwu Chukwuneny. An Algorithm for Global Optimal Strategies and Returns in One Fell Swoop, for a Class of Stationary Equipment Replacement Problems with Age Transition Perspectives, Based on Nonzero Starting Ages, *Advances in Research*, 2016, Vol. 7, pp. 1-20.

13. *Sadeghpour Houman & Tavakoli A. & Kazemi Mostafa & Pooya Alireza*. A novel approximate dynamic programming approach for constrained equipment replacement problems: A case study, *Advances in Production Engineering & Management*, 2019, pp. 355-366.
14. *Abensur Eder & Santos Bruna & Bandeira Anselmo*. Optimization models as applied to equipment replacement problems: review and trends, *Gestão & Produção*, 2023, pp. 456-487.
15. *Sobczak-Piąstka Justyna & Matviishyn Yevhen & Famulyak Yuriy*. Planning of Rational Terms of the Construction Equipment Replacement, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 960-974.
16. *Sniedovich M*. Dynamic Programming: Foundations and Principles. Taylor & Francis, 2010, 624 p.
17. *Nocedal J., Wright S.J.* Numerical Optimization. Springer, 2006, 636 p.
18. *Russell S., Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed.. Prentice Hall, 2011. 1152 p.
19. *Abensur Eder & Santos Bruna & Bandeira Anselmo*. Optimization models as applied to equipment replacement problems: review and trends, *Gestão & Produção*, 2023, pp. 78-92.
20. *Gorbachev S., Bozhenyuk A., Nikashina P.* Optimization of Traffic Flow Based on Periodic Fuzzy Graphs, S. Bhattacharyya et al. (Eds.): *Intelligent Human Centered Computing*. Human 2023, Springer Tracts in Human-Centered Computing (STHC), 2023, pp. 374-383.
21. *Bozhenyuk A., Knyazeva M., Kosenko O., Rozenberg I.*: Strong Connectivity Definition of Periodic Fuzzy Graph, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, Vol. 758, pp. 168-174.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Е. Сергеев.

Боженюк Александр Витальевич – Южный федеральный университет; e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371743; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Л.С. Берштейна; д.т.н.; профессор.

Князева Маргарита Владимировна – e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; тел.: +78634371743; кафедра информационно-аналитических систем безопасности имени профессора Л.С. Берштейна; к.т.н.; доцент.

Косенко Олеся Валентиновна – e-mail: ovkosenko@sfedu.ru; тел.: +78634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Косенко Ева Евгеньевна – e-mail: kose@sfedu.ru; тел.: +7634371689; студент.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – Southern Federal University; e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371743; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein Leonid Samoylovich; dr. of eng. sc.; professor.

Knyazeva Margarita Vladimirovna – e-mail: mknyazeva@sfedu.ru; phone: +78634371743; the department of information and analytical security systems named after professor Bershtein Leonid Samoylovich; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kosenko Olesya Valentinovna – e-mail: ovkosenko@sfedu.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kosenko Eva Evgenievna – e-mail: kose@sfedu.ru; phone: +786343716-89; student.