

МРНТИ 27.03.45
УДК 51.511.534

<https://doi.org/10.51889/2020-4.1728-7901.05>

А.Е. Исмайылов¹, Ж. Қожамқұлова², М. Серікулы³

^{1,3}*Алматын қаласының технологиялық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан*

²*Алматын қаласының энергетика және байланыс университеті, Алматы қаласы, Қазақстан*

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ГАРАНТИРОВАННОГО РЕЗУЛЬТАТА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ

Аннотация

В работе разработан алгоритм получения оптимального гарантированного результата для объектов с экстремальными состояниями основанный на установлении функции и функционалов аналитического вида. Изложена методика выбора стратегии управления объектом с наилучшим гарантированным результатом. Сущность методики заключается в нахождении оптимального решения многокритериальной задачи, которое максимизирует значения всех функций. При этом существование решения, буквально максимизирующего все целевые функции, является редким исключением. Рассматривалась проблема получения гарантированного результата и исследование возможности его улучшения, а также проблема выбора рационального решения.

Установлено, что стратегия, которая имеет в данной операции оценку эффективности, равную наилучшему (наибольшему) гарантированному результату, и является оптимальной гарантирующей стратегией. Определена целевая функция, также предпринята оптимально гарантированная стратегия для управления биотехнологических производств с применением информационных технологий.

Ключевые слова: многокритериальная задача, наилучший гарантированный результат, наибольший гарантированный результат, биотехнологическая производства (БТП), концепций оптимальности.

Аңдатпа

А.Е. Исмайылов¹, Ж. Қожамқұлова², М. Серікулы³

^{1,3}*Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан*

²*Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан*

ЭКСТРЕМАЛЬДЫ ЖАҒДАЙЛАРЫ БАР НЫСАНДАР ҮШІН ОҢТАЙЛЫ КЕПІЛДЕНДІРІЛГЕН НӘТИЖЕ АЛУ АЛГОРИТМІ

Бұл жұмыста аналитикалық форманың функциясы мен функцияларын орнатуға негізделген экстремалды күйдегі объектілер үшін оңтайлы кепілдендірілген нәтижені алу алгоритмі жасалған. Ең жақсы кепілдендірілген нәтижеге ие объектіні басқару стратегиясын таңдау әдістемесі сипатталған. Техниканың мәні - барлық функциялардың мәндерін максимумға жеткізетін мультикритериялы есептердің оңтайлы шешімін табу. Сонымен қатар, барлық объективті функцияларды сөзбе-сөз максимизациялайтын шешімнің болуы сирек кездесетін ерекшелік болып табылады. Кепілдендірілген нәтиже алу және оны жақсарту мүмкіндігін зерттеу, сонымен қатар ұтымды шешімді таңдау мәселесі қарастырылды.

Берілген операциядағы тиімділікті ең жақсы (ең үлкен) кепілдендірілген нәтижеге теңестіретін стратегия оңтайлы кепілдік стратегиясы екендігі анықталды. Мақсатты функция анықталды және ақпараттық технологияларды қолданатын биотехнологиялық салаларды басқарудың оңтайлы кепілдендірілген стратегиясы қабылданды.

Түйін сөздер: көп критерилі есеп, ең жақсы кепілді нәтиже, ең үлкен кепілді нәтиже, биотехнологиялық өндіріс, тиімділік концепциясы.

Abstract

AN ALGORITHM FOR OBTAINING THE OPTIMAL GUARANTEED RESULT FOR OBJECTS WITH EXTREME CONDITIONS

Ismayilov A.E.¹, Kozhamkulova Zh.², Serikuly M.³

^{1,3}*Almaty technological University, Almaty, Kazakhstan*

²*Almaty University of Energy and Communications, Almaty, Kazakhstan*

In this paper, an algorithm for obtaining the optimal guaranteed result for objects with extreme states is developed, based on the establishment of the function and functionals of an analytical form. The methodology for choosing a control strategy for an object with the best guaranteed result is described. The essence of the technique is to find an optimal solution to a multicriteria problem that maximizes the values of all functions. At the same time, the existence of a solution

that literally maximizes all objective functions is a rare exception. The problem of obtaining a guaranteed result and the study of the possibility of its improvement, as well as the problem of choosing a rational solution were considered.

It has been established that a strategy that has an efficiency estimate in a given operation equal to the best (largest) guaranteed result is the optimal guaranteeing strategy. The objective function has been determined, and an optimally guaranteed strategy has been undertaken for the management of biotechnological industries using information technology.

Keywords: multi-objective problem, the best guaranteed result, the highest guaranteed result, biotechnological production, concepts of optimality.

Введение

Методы решения классических задач управления, успешно реализуемые в штатных ситуациях, не в состоянии обеспечить решение всех проблем управления, возникающих в экстремальных (аварийных) ситуациях динамической среды обитания производственного объекта. Это приводит к необходимости совместного использования различных методов (ситуационного, оптимального, гарантированного результата) на соответствующих этапах решения задач управления.

В связи с этим разработка, исследование и практическое применение алгоритмов управления производственными объектами при экстремальных состояниях, ориентированных на повышение эффективности функционирования объекта управления, является актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма оптимального гарантированного результата, которые будут способствовать повышению эффективности функционирования многокритериального объекта управления.

Научная новизна полученных результатов работы заключается в следующем:

- разработан алгоритм выбора стратегии управления объектом с наилучшим гарантированным результатом, основанный на определении функции и функционалов;
- установлено, что стратегия, которая имеет в данной операции оценку эффективности, равную наилучшему гарантированному результату, и является оптимальной гарантирующей стратегией.

Синтез оптимальных законов управления, обеспечивающих достижение поставленных целей, выраженных в терминах экстремальных задач, является кардинальной проблемой теории и практики управления, которая влечет многочисленные теоретические исследования, группирующиеся главным образом вокруг известных соотношений Гамильтона - Якоби - Беллмана и их дискретных аналогов в методе динамического программирования [1].

Формально многокритериальная задача выбора стратегии управления процессом БТП (биотехнологическое производство) с наилучшим (наибольшим) гарантированным результатом задается множеством «допустимых решений» и набором целевых функций на U , принимающих действительные значения. Сущность многокритериальной задачи состоит в нахождении оптимального ее решения, т.е. такого, которое в том или ином смысле максимизирует значения всех функций. При этом существование решения, буквально максимизирующего все целевые функции, является редким исключением. Поэтому в теории формализации многокритериальной задачи понятие «оптимальность» получает различные и притом нетривиальные толкования. Содержание теории формализации многокритериальной задачи состоит в выработке концепций оптимальности, доказательстве их реализуемости (т.е. в существовании оптимальных в соответствующем смысле решений) и нахождении этих реализаций (т.е. в фактическом решении задачи) [2]. Что касается последних работ, то здесь можно отметить работы [3-8] о задачах по вариационному исчислению и оптимального управления с несколькими критериями. Кроме того, в обзорной статье [9] с точки зрения уравнения в частных производных исследовано уравнение Гамильтона - Якоби - Беллмана возникающие в оптимальном контроле с векторной стоимостью.

Оценку выбранной стратегии управления (\tilde{u}) , определяемой как $Sup \inf_{y \in Y} \Phi(\tilde{u}, y)$, можно написать в следующем виде [2]:

$$Sup \inf(\Phi(U, y)) = Sup \inf_{u \in U} \inf_{\xi \in E} (\Phi_1(u(\xi), \xi)) + \\ + Sup \inf_{u \in U} \inf_{z \in Z} (\Phi_2(u(Z), Z)) + \dots + Sup \inf_{u \in U} \inf_{\tau \in T} (\Phi_n(u(\tau), \tau)) \quad (1)$$

Постановка задачи.

Рассмотрим многокритериальную задачу для задачи, где Φ_1, Φ_2, Φ_3 - функционалы соответственно для спирта, ингибитора, пенообразование, где $\Phi(\tilde{y}, y)$ - целевая функция; Y, E, Z, T - соответственно области изменения случайных величин.

Отсюда оценки наилучшего гарантированного результата приведем к отысканию экстремальных стратегий управления процессом БТП, для которых члены выражения (1) достигали бы своих наилучших значений:

$$\text{Sup inf}(\Phi(U, y)) = \text{Sup}_{u \in U} \inf_{\xi \in E} (\Phi_1(u(\xi), \xi)) + \text{Sup}_{u \in U} \inf_{z \in Z} (\Phi_2(u(Z), Z)) + \text{Sup}_{u \in U} \inf_{\tau \in T} (\Phi_3(u(\tau), \tau)) \quad (2)$$

В зависимости от множества стратегий управления \tilde{y} и информации о неопределенном факторе (зависящей от состояний процесса брожения БТП) вид и форма записи оптимальной гарантирующей стратегии конкретизируются [10].

Работа алгоритма выбора стратегии управления объектом с наилучшим гарантированным результатом осуществляется следующим образом и блок-схема алгоритма приведен в рисунке 1:

Начало.

Вводятся переменные.

$$\xi, z, \tau, u, N, C, n, k, l, i, \varepsilon, r$$

(значение ε выбирается лицом принимающего решения на основе технологических регламентов, технической документации, экономических и экологических норм и других нормативов).

Производится установление функции аналитического вида $u(\xi)$.

Осуществляется установление аналитического вида функционалов

$$\Phi_1(u), \Phi_2(u), \Phi_3(u),$$

$$F_\xi(x), F_z(x), F_\tau(x).$$

Определяются граничные значения (априорно или от экспертов) случайных чисел

$$\xi_n \leq \xi \leq \xi_g,$$

$$z_n \leq z \leq z_g,$$

$$\tau_n \leq \tau \leq \tau_g.$$

Производится обращение к генератору случайных чисел компьютера и определение $\Gamma \in [0, 1]$ случайного числа.

Проверяется условие: распределена ли равномерно случайная величина ξ .

Если условие шага 7 не выполняется, то решается уравнение относительно ξ :

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\xi} F_\xi(x) dx,$$

где $F_\xi(x)$ - функция распределения случайной величины ξ .

Если условие шага 7 выполняется, то проводится расчет $\xi = \Gamma * (\xi_g - \xi_n)$ блока 13, и информация передается в блок 9.

Далее проверяется условие: распределена ли равномерно случайная величина z .

Если условие шага 9 не выполняется, то переходим к решению уравнения относительно z :

$$\Gamma = \int_{-\infty}^z F_z(x) dx,$$

где $F_z(x)$ - функция распределения случайной величины z .

Если условие шага 9 выполняется, то проводится расчет $z = \Gamma * (z_g - z_n)$ блока 14, и информация передается в блок 11. [11, 12].

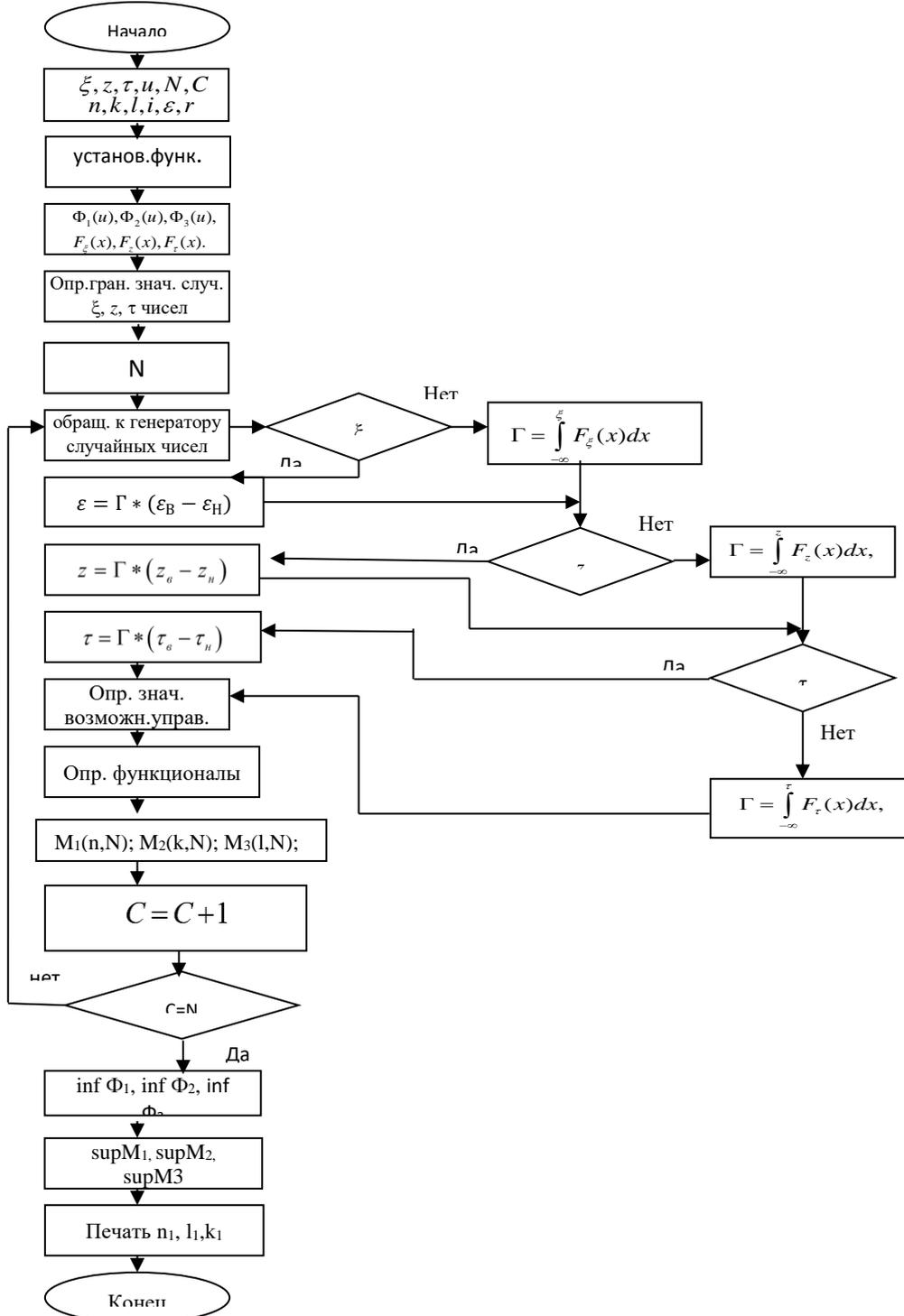


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма выбора стратегии управления объектом с наилучшим гарантированным результатом

На следующем шаге проверяется условие: распределена ли равномерно случайная величина τ . Если условие шага 11 не выполняется, то переходим к решению уравнения относительно τ :

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\tau} F_{\tau}(x) dx,$$

где $F_{\tau}(x)$ - функция распределения случайной величины z .

Если условие шага 11 выполняется, то проводится расчет $\tau = \Gamma * (\tau_g - \tau_n)$ блока 15, и информация передается в блок 16.

Определяются значения для всех возможных управлений [10]

$$\begin{aligned} &u_1(\xi), u_2(\xi), u_3(\xi), \dots, u_n(\xi), \\ &u_1(z), u_2(z), \dots, u_k(z), \\ &u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, u_l(\tau). \end{aligned}$$

Соответственно необходимо определить

$$\begin{aligned} &\Phi_1(u_i(\xi)), \Phi_2(u_j(z)), \Phi_3(u_m(\tau)), \\ &i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k}; m = \overline{1, l}. \end{aligned}$$

Вводится число испытаний $N =$ (например) 1000 [11].

Создаются три массива

$$M_1(n, N); M_2(k, N); M_3(l, N),$$

и в них сохраняются значения

$$\Phi_{1,n}, \Phi_{2,k}, \Phi_{3,l},$$

где n, k, l - число возможных управлений соответственно для Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

Устанавливается счётчик $C = C + 1$.

Проверяется условие: $C = N$.

Если условие шага 21 выполняется, то определяем

$$\begin{aligned} &\inf [\Phi_1(u_i(\xi_1)), \Phi_1(u_i(\xi_2)), \dots, \Phi_1(u_i(\xi_N))], i = \overline{1, n}, \\ &\inf [\Phi_2(u_i(z_1)), \Phi_2(u_i(z_2)), \dots, \Phi_2(u_i(z_N))], i = \overline{1, k}, \\ &\inf [\Phi_3(u_i(\tau_1)), \Phi_3(u_i(\tau_2)), \dots, \Phi_3(u_i(\tau_N))], i = \overline{1, l} \end{aligned}$$

с таким условием, чтобы неудовлетворяющие условию заменить нулями или очистить эту ячейку. При этом область управления определяется с некоторой погрешностью $\varepsilon > 0$ [13], [14].

Если условие шага 21 не выполняется, то управление передается блоку 6, в котором происходят обращение к генератору случайных чисел компьютера и определение $\Gamma \in [0, 1]$ случайного числа.

Из массивов $M_1(n, N); M_2(k, N); M_3(l, N)$ определяем

$$\sup [M_1(n, N)], \sup [M_2(k, N)], \sup [M_3(l, N)]$$

и соответственно номера ячеек $M_1(n, N_1), M_2(k, N_2), M_3(l, N_3)$. Отсюда n_1, k_1, l_1 .

На печать выводится: управлением с гарантированным результатом является управляющее воздействие с номером n_1, k_1, l_1 .

Выводы

Таким образом, изложены возможности получения оптимального гарантированного результата для объектов с экстремальными состояниями. Рассматривалась проблема получения гарантированного результата и исследование возможности его улучшения, а также проблема выбора рационального решения. Определена целевая функция как одно число, причем эта характеристика базируется на принципе гарантированного результата, а также предпринята попытка применить оптимальную

гарантированную стратегию для управления многокритериальных БТП с применением информационных технологий.

Разработана методика выбора стратегии управления объектом с наилучшим гарантированным результатом. Сущность методики заключается в нахождении оптимального решения многокритериальной задачи, которое максимизирует значения всех функций. При этом оптимальной является гарантирующая стратегия, имеющая в данной операции оценку эффективности, равную наилучшему (наибольшему) гарантированному результату [15].

Промышленные испытания проведены с целью реализации предложенных моделей, алгоритмов и программ, входящих в математическое описание системы управления (СУ) на действующем объекте биотехнологического производства.

Начальные концентрации субстрата, ингибитора и др. определялись путем лабораторных анализов, которые проводились в центральной лаборатории цеха.

В результате реализации данной системы отклонение концентрации биомассы от ее среднего значения снизилось на 9,9%, а производительность повысилась на 8-9%.

Производственные испытания СУ с предложенными математическими моделями и алгоритмами в виде комплекса программных средств проведены на «Химфарм» и ТОО «НУР».

Список использованной литературы:

- 1 Гурман В. И., Расина И. В. (2011) Улучшение и приближенно-оптимальный синтез управления в окрестности опорной траектории // *Автомат. и теле мех.* №12, С.24-37
- 2 Кунцевич В.М. (2006) Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации // Киев: Наукова думка. - 264 с.
- 3 Hamel A.H., Visetti D. (2020) The value functions approach and Hopf-Lax formula for multiobjective costs via set optimization // *J. Math. Anal. Appl.* Vol. 483, №1, Article ID 123605.
- 4 Guigue A. (2013) Set-valued return function and generalized solutions for multiobjective optimal control problems (MOC) // *SIAM J. Control Optim.* Vol. 51, №3, P.2379-2405.
- 5 Bonnel H., Kaya C.Y. (2010) Optimization over the efficient set of multi-objective convex optimal control problems // *J. Optim. Theory Appl.* Vol. 147, №1, P.93-112.
- 6 Zhang Q., Yang S., Jiang S., Wang R., Li X. (2020) Novel Prediction Strategies for Dynamic Multiobjective Optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation.* Vol. 24, №2, P.260-274.
- 7 Dai M., Tang D., Giret A., Salido M. A. (2019) Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* Vol. 59, P.143-157.
- 8 Guo J., Liang J.H., Shi K., Yang D., Zhang J., Czarnecki K., Yu H. (2019) SMTIBEA: a hybrid multi-objective optimization algorithm for configuring large constrained software product lines // *Software and Systems Modeling.* Vol. 18, №2, P.1447-1466.
- 9 Katzourakis N., Pryer T. (2018) A review from the PDE viewpoint of Hamilton-Jacobi-Bellman equations arising in optimal control with vectorial cost // *J. Nonlinear Funct. Anal.* Vol. 2018, P.1-20.
- 10 Исмаилов М.А., Каипбергенов Б.Т. (2004) Диагностирование и управление технологическими процессами биохимического производства // Ташкент: Фан ватехнология. - 132 с.
- 11 Фомин Г.П. (2009) Математические методы и модели в коммерческой деятельности // Изд.дом «Инфра-М». -640с.
- 12 Звонарев С.В. (2019) Основы математического моделирования: учебное пособие // Екатеринбург: Изд-во Урал. Унив-та. - 112с.
- 13 Ахмадиев Ф.Г., Гильфанов Р.М. (2017) Математическое моделирование и методы оптимизации // Казань.-178с.
- 14 Лапишин В.С. (2015) Управление процессами. Саранск, Изд-во Мордов. Университета, 385.
- 15 Гранчин О.Н. (2001) Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при произвольных помехах // Москва. - 250с.

References:

- 1 Gurman V. I., Rasina I. V. (2011) Uluchshenie i priblizhenno-optimal'nyj sintez upravlenija vokrestnosti opornoj traektorii [Improvement and approximate-optimal synthesis of the control of the vicinity of the reference trajectory]. *Avtomat. i tele meh.* №12, 24-37. (In Russian)
- 2 Kuncевич V.M. (2006) Upravlenie v uslovijah neopredelennosti: garantirovannye rezul'taty v zadachah upravlenija i identifikacii [Management under uncertainty: guaranteed results in management and identification tasks]. Kiev, *Naukova dumka*, 264. (In Russian)

- 3 Hamel A.H., Visetti D. (2020) *The value functions approach and Hopf-Lax formula for multiobjective costs via set optimization*. *J. Math. Anal. Appl.* Vol. 483, №1, Article ID 123605. (In English)
- 4 Guigue A. (2013) *Set-valued return function and generalized solutions for multiobjective optimal control problems (MOC)*. *SIAM J. Control Optim.* Vol. 51, №3, 2379-2405. (In English)
- 5 Bonnel H., Kaya C.Y. (2010) *Optimization over the efficient set of multi-objective convex optimal control problems*. *J. Optim. Theory Appl.* Vol. 147, №1, 93-112. (In English)
- 6 Zhang Q., Yang S., Jiang S., Wang R., Li X. (2020) *Novel Prediction Strategies for Dynamic Multiobjective Optimization*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 24, №2, 260-274. (In English)
- 7 Dai M., Tang D., Giret A., Salido M. A. (2019) *Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 59, 143-157. (In English)
- 8 Guo J., Liang J.H., Shi K., Yang D., Zhang J., Czarnecki K., Yu H. (2019) *SMTIBEA: a hybrid multi-objective optimization algorithm for configuring large constrained software product lines*. *Software and Systems Modeling*. Vol. 18, №2, 1447-1466. (In English)
- 9 Katzourakis N., Pryer T. (2018) *A review from the PDE viewpoint of Hamilton-Jacobi-Bellman equations arising in optimal control with vectorial cost*. *J. Nonlinear Funct. Anal.* Vol. 2018, 1-20. (In English)
- 10 Ismailov M.A., Kaipbergenov B.T. (2004) *Diagnostirovanie i upravlenie tehnologicheskimi processami biokhimicheskogo proizvodstva [Diagnostics and control of technological processes of biochemical production]*. Tashkent. *Fan vatehnologija*, 132. (In Russian)
- 11 Fomin G.P. (2009) *Matematicheskie metody i modeli v kommercheskoj dejatel'nosti [Mathematical methods and models in commercial activity]*. Izd.dom «Infra-M», 640. (In Russian)
- 12 Zvonarev S.V. (2019) *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: uchebnoe posobie [Fundamentals of mathematical modeling: a textbook]*. Ekaterinburg, Izd-vo Ural Univ-ta, 112. (In Russian)
- 13 Ahmadiev F.G., Gil'fanov R.M. (2017) *Matematicheskoe modelirovanie i metody optimizacii [Mathematical modeling and optimization methods]*. Kazan, 178. (In Russian)
- 14 Lapshin V.S. (2015) *Upravlenie processami [Process Management]*. Saransk, Izd-vo Mordov. Universiteta, 385. (In Russian)
- 15 Granchin O.N. (2001) *Randomizirovannyye algoritmy ocenivaniya i optimizacii pri proizvolnyh pomexah [Randomized algorithms for random noise estimation and optimization]*. Moskva, 250. (In Russian)