

УДК 658.5.012.011.56

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.008)

Автоматизированная система управления технологическим процессом получения элементарной серы на основе оценки рисков

Д.В. Печенкин¹, Б.С. Дмитриевский², И.А. Щербатов³

¹Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

²Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Резюме: Рассматривается такой вид объектов управления, которые функционируют в различных условиях неопределенности и требуют разработки специфического подхода к управлению, анализу и оценке множества факторов, влияющих на их работу и не поддающихся количественному и качественному описанию. В исследовании сформулирована задача управления технологическим процессом получения серы. Проведен анализ технологической установки получения элементарной серы методом Клауса как объекта управления. Выделены факторы риска для рассматриваемого процесса. Предложена модель идентификации текущего состояния объекта управления. Синтезирован алгоритм интеллектуализации управления, выступающего в качестве базы для разрабатываемой экспертной подсистемы. Приведена структура и порядок функционального взаимодействия экспертной подсистемы автоматизированной системы управления технологическим процессом с лицом, принимающим решения. Разработано алгоритмическое обеспечение экспертной подсистемы автоматизированной системы управления технологическим процессом получения серы, предназначенной для интеграции в операционную среду управления на автоматизированном рабочем месте оператора. Оценена эффективность работы синтезированной экспертной подсистемы путем использования учебного тренажера, имитирующего работу щита управления технологической установкой получения элементарной серы методом Клауса. По результатам моделирования 35 аварийных ситуаций 100% было идентифицировано экспертной подсистемой, из которых 28% удалось предотвратить на ранней стадии путем выполнения сгенерированных рекомендаций.

Ключевые слова: автоматизация, управление, получение серы, метод Клауса, технологический процесс, аварийная ситуация, нечеткая логика, Мамдани, фактор риска, экспертная подсистема.

Для цитирования: Печенкин Д.В., Дмитриевский Б.С., Щербатов И.А. Автоматизированная система управления технологическим процессом получения элементарной серы на основе оценки рисков. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3).

Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PechenkinSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.008

Automated process control system for obtaining elemental sulfur based on risk assessment

D.V. Pechenkin¹, B.S. Dmitrievsky², I.A. Shcherbatov³

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

²Tambov State Technical University, Tambov, Russia

³National research University "MPEI", Moscow, Russia

Abstract: We consider this type of management objects, the functioning of which occurs under various types of uncertainty and requires the development of a specific approach to management, analysis and

evaluation of a variety of factors that affect the work and are not amenable to quantitative and qualitative description. In this paper, the task of controlling the technological process of obtaining sulfur is formulated. The analysis of the technological installation for obtaining elemental sulfur by the Claus method as a control object is carried out. Risk factors for the process under consideration are highlighted. A model for identifying the current state of the control object is proposed. The algorithm of management intellectualization, which acts as a base for the developed expert subsystem, is synthesized. The structure and order of functional interaction of the expert subsystem of the automated process control system with the decision-maker is given. The author developed an algorithmic support for the expert subsystem of the automated control system for the technological process of sulfur production, designed for integration into the operating environment of the operator's automated workplace. The efficiency of the synthesized expert subsystem is evaluated by using a training simulator that simulates the operation of the control panel of the process unit for obtaining elemental sulfur using the Claus method. Based on the results of modeling 35 emergencies, 100% were identified by the expert subsystem, of which 28% were prevented at an early stage by implementing the generated recommendations.

Keywords: automation, sulfur production, Claus method, technological process, emergency, fuzzy logic, Mamdani, risk factor, expert subsystem.

For citation: Pechenkin D.V. , Dmitrievsky B.S., Shcherbatov I.A. Automated process control system for obtaining elemental sulfur based on risk assessment. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PechenkinSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.008 (In Russ).

Введение

В результате анализа производственной деятельности опытных операторов технологической установки получения элементарной серы выяснено, что управляющие решения в процессе ведения процесса принимаются в условиях неопределенности. Она проявляется в виде отсутствия полных и точных данных о параметрах контролируемого технологического процесса (ТП), таких как активность катализатора в реакторах; скопление шлама в защитных сетках гидрозатворов котлов-утилизаторов; текущая активность адсорбента и т.д. Рассмотрение технологической установки в качестве опасного производственного объекта (ОПО) на производстве подразумевает включение человека, как лица, принимающего решения (ЛПР), в компонентный состав системы управления [1]. Необходимо учитывать риски, продуцируемые ЛПР в совокупности с рисками оборудования, входящего в состав автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) [2]. Кроме этого, требуется принимать во внимание преднамеренное, злоумышленное воздействие на объект управления с целью его вывода из штатного технологического режима.

Целесообразным является подход к интеллектуализации управления путем разработки и реализации управляющих воздействий, нацеленных на распознавание, недопущение или предотвращение возникновения неблагоприятного (аварийного) состояния управляемого объекта. Управление, основанное на оценке рисков, приводит к значительному снижению количества аварийных ситуаций при протекании ТП, так как расходы на идентификацию и ликвидацию неблагоприятных факторов ниже, чем на ликвидацию кризисного состояния объекта, которое эти факторы могут вызвать [3]. В этой связи актуальной задачей является интеллектуализация управления процессом получения серы как источником повышенной опасности на основе оценки рисков развития аварийных ситуаций.

Анализ объекта управления

Проведённый анализ позволил выявить основные факторы риска развития аварийных ситуаций. Для удобства обозначения входные переменные объединены в подмножества по трем признакам, возмущающие воздействия – по двум [4].

Установка получения элементарной серы методом Клауса как объект управления характеризуется множествами входных и выходных переменных, управляющих и возмущающих воздействий, и представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Анализ установки получения серы методом Клауса как объекта управления
 Figure 1 – Analysis of the installation for obtaining sulfur using the Claus method as a control object

Задача управления ТП получения серы методом Клауса сформулирована следующим образом: найти такие управляющие воздействия U , при которых достигается снижение количества аварийных ситуаций N с учетом воздействия возмущений W :

$$F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, P, O) = \min_{\{P, O\} \in U} N \quad (1)$$

$$\{P, O\} \in U;$$

$$\{X_2, X_4, X_5 \in X\};$$

$$\{X_1, X_3\} \in W;$$

$$N \in Y.$$

где N – количество аварийных ситуаций, U – управляющие воздействия (расход, скорость турбин, соотношение воздух/кислый газ и др.), $\{P, O\}$ – решения по управлению на основе экспертных знаний, X_1 - X_5 – переменные объекта управления, W – вектор возмущающих воздействий (изменение состава кислого газа, колебания давления вспомогательных сред и др.), Y – вектор выходных переменных.

Особенностью некоторых переменных является отсутствие возможности измерения традиционными способами и количественного описания [5]. Они могут быть представлены только в виде экспертных оценок, косвенных признаков и лингвистических описаний. Процесс Клауса является слабоформализуемым, что предопределяет применение математического аппарата теории нечетких множеств с целью описания имеющейся неопределенности [6].

При такой модели оценки риска развития аварийной ситуации на установке имеют место вычисления как с количественными, так и с качественными переменными, преобразуя модель в комбинированную (гибридную) [7]. Введем обозначение количественных переменных модели оценки риска как X , а качественных как \tilde{X} . Таким образом оценку риска в общем виде возможно представить как:

$$R = f(X, \tilde{X}), \quad (2)$$

где R - обобщенная характеристика риска, полученного для слабоформализуемого процесса, и влияющего на количество аварийных ситуаций N , f - функциональная зависимость оценки риска развития аварийной ситуации на объекте, учитывающая как количественные, так и качественные переменные.

Выделим 5 комплексных показателей риска: F_1 - технологический; F_2 - параметрический; F_3 - технический; F_4 - аппаратурный; F_5 - субъективный (см. табл. 1). Каждый из $F_i, i = \overline{1,5}$ зависит от переменных $X_{ij}, \tilde{X}_{ij}, j'+j'' = j = \overline{1, m_i}$, где m_i - число входных переменных i -го показателя, j', j'' - число количественных и качественных переменных, соответственно. Показатели $F_1 - F_5$ влияют на обобщенный показатель риска:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot F_i, \sum_{i=1}^n w_i = 1, n = 5, \quad (3)$$

где F_0 - обобщенный показатель риска, F_i - i -ый показатель риска, w_i - вес соответствующего показателя риска.

Далее введем так называемое «дерево иерархии» факторов риска F , обозначив искомый комплексный риск-фактор F_0 (рисунок 2).

Впоследствии требуется наложить на полученную иерархию факторов риска систему весов S . При наличии возможности определить наиболее значимые факторы, эксперты осуществляют ранжирование [8] составляющих базовых факторов по убыванию значения их влияния, и таким образом «вес» i -го фактора возможно вычислить по правилу Фишберна:

$$w_i = 2(n - i + 1)/(n + 1)n, i = 1 \dots n, \quad (4)$$

где n - количество факторов.

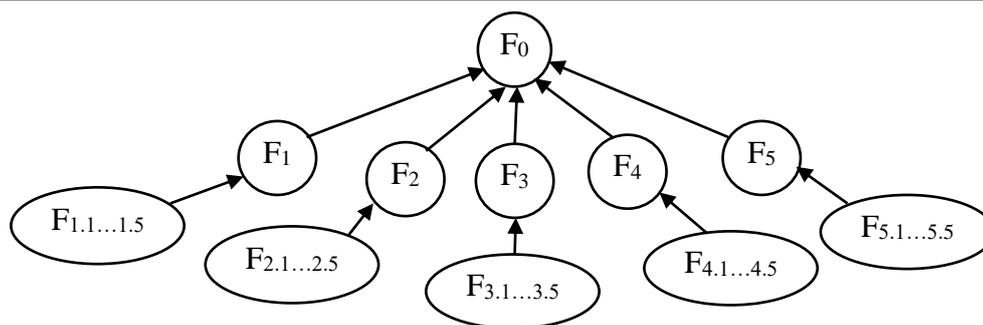


Рисунок 2 – Древоидная иерархия факторов риска процесса получения серы
 Figure 2 – Tree hierarchy of risk factors for the sulfur production process

Тогда система весов S примет вид:

$$S = \{F_i(\phi)F_j \mid \phi \in (\succ, \approx)\}, \quad (5)$$

где \succ - отношение предпочтения, \approx - отношение безразличия.

В рассматриваемой системе, где факторы риска равнопредпочтительны или нет системы предпочтений, принимаем:

$$w_i = 1/n. \quad (6)$$

Важно учесть, что принятая экспертами система предпочтений является смешанной, т.к. в ее составе присутствуют как отношения предпочтения, так и отношения безразличия. Поэтому числители рациональных дробей, являющихся коэффициентами Фишберна, необходимо определять по рекурсивной схеме.

Важно отметить, что принятая экспертами система предпочтений, определяется среди базовых показателей между их составляющими, а также является единственной верной. Каждый показатель $F_1 - F_5$ - безразмерный и принимает значения из интервала $[0;1]$, причем 1 - это максимальное значение показателя. Следовательно, что и $F_0 \in [0;1]$ (см. формулу 3).

Рассмотрим интерпретацию значения, принадлежащего интервалу $[0;1]$.

Значения F_i зависят не только от X , но и от \tilde{X} . В соответствии с подходом, основанном на использовании комбинированных математических моделей, преобразуем X следующим образом: $\tilde{X}' = fuz(X)$, т.е. приведем к нечеткости все четкие переменные (на данном шаге способ фазификации не существен) [9]. Тогда расчет показателя F_i (в частности, рассматриваемый подход актуален для расчета базового параметрического показателя) производится по следующей схеме:

$$F_i = defuz[FI(fuz(X_{ij}), \tilde{X}_{ij'})] \quad (7)$$

где $FI(\)$ - нечеткий логический вывод; $defuz[\]$ - метод приведения к четкости (дефазификации).

С учетом (3) и (7) получим:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot defuz[FI(fuz(X_{ij}), \tilde{X}_{ij'})] \quad (8)$$

Итогом проведения оценки риска развития аварийной ситуации в количественном и качественном выражении является результат агрегирования данных, собранных в рамках древовидной иерархии по направлению снизу-вверх.

Управляющее воздействие генерируется, исходя из конкретной ситуации на установке и объема предоставленных инструментов и средств для повышения уровня безопасности [10]. Для синтеза алгоритма интеллектуализации [11] управления, выступающего в качестве базы для разрабатываемой экспертной подсистемы, выделены следующие шаги:

- Шаг 1.** Ввод актуальной информации о факторах риска;
- Шаг 2.** Расчет риска развития аварии на рассматриваемом объекте управления;
- Шаг 3.** Интерпретация текущей ситуации на установке, определение характера развития аварийной ситуации (требует немедленных действий по локализации или относится к долгосрочным);
- Шаг 4.** Генерация управляющих воздействий, реализация которых приведет к устранению риска развития аварии;

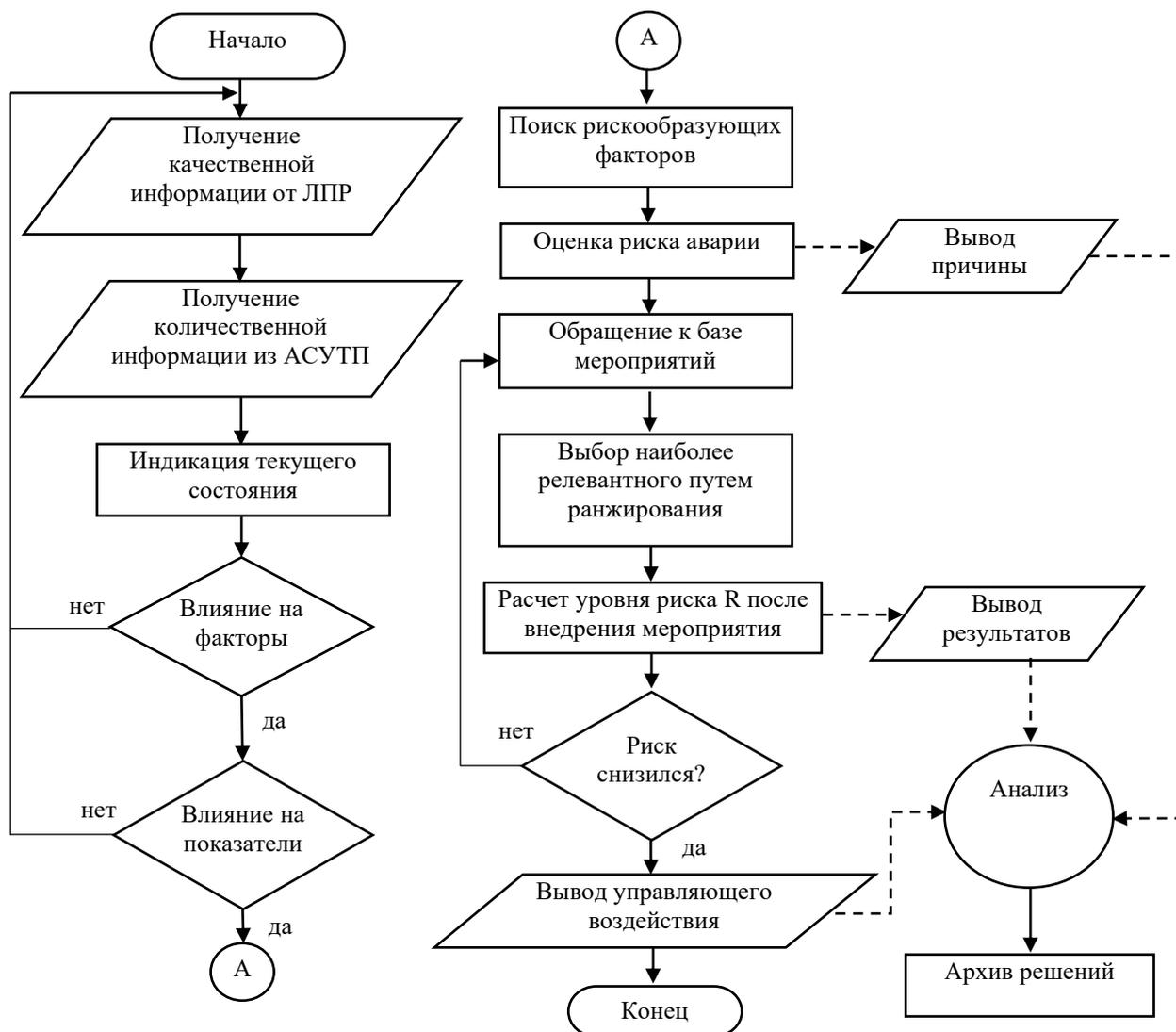


Рисунок 3 – Алгоритм работы ЭП АСУТП

Figure 3 – Algorithm of operation of the expert subsystem of the automated control system

Сформулированы требования, предъявляемые к ЭП АСУТП:

1. ЭП АСУТП не должна зависеть ни от одного из принимаемых ЛПР различных решений при оказании ему помощи.
2. Использование ЭП АСУТП не должно вызывать трудностей. Это обеспечивается необходимой адаптивностью системы к виду задач, особенностям организационного окружения и уровнем квалификации пользователя, а также дружественным интерфейсом.
3. Обеспечение многопользовательского доступа к ЭП АСУТП.
4. Обработка информации в ЭП АСУТП должна проходить быстро и надежно.
5. Возможность добавления новых знаний в ЭП АСУТП путем конвертации нового экспертного опыта в правила.

Вышеперечисленные требования возможно удовлетворить применением соответствующих технологий обработки данных и сетевого взаимодействия, таких как: высокопроизводительные системы обработки данных, используемые в современных системах управления базами данных и технология клиент/сервер. Таким образом, предъявляются минимальные требования к клиентской станции и межплатформенной переносимости.

Разработано алгоритмическое обеспечение экспертной подсистемы (ЭП) АСУТП получения серы, предназначенной для интеграции в операционную среду управления на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора (рисунок 3).

Результаты

Оценена эффективность работы синтезированной ЭП АСУТП. Для проведения эксперимента использовался учебный тренажер, имитирующий работу щита управления установкой получения серы. Тестирование проводилось с учетом 118 эксплуатационных параметров, которые последовательно изменялись характерным для определенной ситуации образом до достижения порога сигнализационных и блокировочных значений штатной системы противоаварийной защиты (ПАЗ). По результатам моделирования 35 аварийных ситуаций 100% было идентифицировано ЭП АСУТП, из которых 28% удалось предотвратить на ранней стадии путем выполнения рекомендаций ЭП АСУТП (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Table 1 – results of the experiment

	ПАЗ	ЭП АСУТП
Время работы	210 минут	210 минут
Параметры	118	118
Сигнализации	72	72
Аварийные ситуации	32	23
Достижение аварийного состояния	100%	72%

Тестирование позволяет сделать вывод о том, что с применением синтезированной ЭП АСУТП возможно уменьшить количество аварийных ситуаций на 28% по сравнению с применением в работе только одной системы ПАЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проталинский О.М., Ажмухамедов И.М.. Системный анализ и моделирование слабо структурированных и плохо формализуемых процессов в социотехнических

- системах. *Инженерный вестник Дона*. 2012;3. Доступно по: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/916> (дата обращения: 20.08.2020).
2. Печенкин Д.В. Система оценки риска при эксплуатации технологических установок получения элементарной серы методом Клауса. *Системы. Методы. Технологии*, 2018;1(37):72-78.
 3. Проталинский О. М., Щербатов И. А. Программный комплекс для обучения операторов технологического процесса получения серы. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2006;2:29-34.
 4. Frey W. *Socio-Technical Systems in Professional Decision Making*. Доступно по: <http://cnx.org/content/m14025/latest/> (дата обращения: 20.08.2020).
 5. Fishburn P. *Utility Theory for Decision-Making*. N.Y., Wiley, 1970, 234 p.
 6. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели. *Кибернетика и системный анализ*. 2002;5:169-176.
 7. Щербатов И.А. Классификация неопределенностей в задачах моделирования и управления сложными слабоформализуемыми системами. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013;1(1):175-179.
 8. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Esaulenko V.N.. Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach. *World Applied Sciences Journal*. 2013;24(2):276-283.
 9. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Попов Н.С., Дмитриева О.В. Интегрированная модель инновационно-производственной системы. *Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та*. 2016;22(4):550-558.
 10. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Панченко И.С., Кокорева М.В. *Системы диспетчеризации и управления: учебное пособие*. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2013. - 96 с.
 11. Львович Я.Е., Питолин А.В., Сапожников Г.П. Многометодный подход к моделированию сложных систем на основе анализа мониторинговой информации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(2):301-310.

REFERENCES

1. Protalinskii O.M., Azhmukhamedov I.M.. Sistemnyi analiz i modelirovanie slabostrukturirovannykh i plokho formalizuemykh protsessov v sotsiotekhnicheskikh sistemakh. *Inzhenernyy vestnik Dona (Rus)*. 2012;3. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/916> (In Russ) (accessed: 20.08.2020).
2. Pechenkin D.V. Sistema otsenki riska pri ehkspluatatsii tekhnologicheskikh ustanovok polucheniya ehlementarnoi sery metodom Klause. *Systems. Methods. Technologies*. 2018;1(37):72-78. (In Russ)
3. Protalinskii O. M., Shcherbatov I. A. Programmnyi kompleks dlya obucheniya operatorov tekhnologicheskogo protsessa polucheniya sery. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*. 2006;2:29-34. (In Russ)
4. Frey W. *Socio-Technical Systems in Professional Decision Making*. Available at: <http://cnx.org/content/m14025/latest/> (accessed: 20.08.2020).
5. Fishburn P. *Utility Theory for Decision-Making*. N.Y., Wiley, 1970, 234 p.
6. Rotshtein A.P., Shtovba S.D. Vliyanie metodov defazzifikatsii na skorost' nastroiки nechetkoi modeli. *Kibernetika i sistemnyi analiz*. 2002;5:169-176. (In Russ)
7. Shcherbatov I.A. Klassifikatsiya neopredelennostei v zadachakh modelirovaniya i upravleniya slozhnymi slaboformalizuemymi sistemami. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013;1(1):175-179. (In Russ)

8. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Esaulenko V.N. Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach. *World Applied Sciences Journal*. 2013;24(2):276-283.
9. Matveikin V.G., Dmitrievskii B.S., Popov N.S., Dmitrieva O.V. Integrirovannaya model' innovatsionno-proizvodstvennoi sistemy. *Vestnik Tambov. gos. tekhn. un-ta*. 2016;22(4):550-558. (In Russ)
10. Matveikin V.G., Dmitrievskii B.S., Panchenko I.S., Kokoreva M.V. *Sistemy dispetcherizatsii i upravleniya: uchebnoe posobie*. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO "TGTU", 2013. - 96 p. (In Russ)
11. Lvovich Y.E., Pitolin A.V., Sapozhnikov G.P. Multi-method approach to the modeling of complex systems based on monitoring data analysis. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(2):301-310. (In Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Печенкин Денис Владимирович, аспирант,
Астраханский государственный технический
университет, Астрахань, Российская Федерация.
e-mail: pechenkin1@gmail.com

Denis V. Pechenkin, Postgraduate Student,
Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation.

Дмитриевский Борис Сергеевич, профессор,
Тамбовский государственный технический
университет, Тамбов, Российская Федерация.
e-mail: dmiboris@yandex.ru

Boris S. Dmitrievsky, Professor, Tambov
State Technical University, Tambov,
Russian Federation

Щербатов Иван Анатольевич, к.т.н., доцент,
Национальный исследовательский университет
"МЭИ", Москва, Российская Федерация.
e-mail: ShcherbatovIA@mpei.ru

Shcherbatov Ivan A., Ph. D., Associate
Professor, National Research University
"MPEI", Moscow, Russian Federation.