

## РАБОЧАЯ ПОЗИЦИЯ С ЖЕСТКОЙ МЕЖАГРЕГАТНОЙ СВЯЗЬЮ

**Б.М. Горшков<sup>1</sup>, И.Н. Бобровский<sup>2, 3</sup>, Н.С. Самохина<sup>1</sup>, А.В. Савельев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти, Россия,

<sup>2</sup>Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия,

<sup>3</sup>Самарский научный центр РАН, г. Самара, Россия

Современное конкурентоспособное машиностроительное предприятие должно обеспечивать оперативный переход с одной номенклатуры на другую. Данная тенденция отражена в стратегии научно-технологического развития РФ в части приоритета цифровизации производства. Наиболее ресурсоемка перекомпоновка автоматических линий массового производства, включающих множество рабочих позиций. Связь между агрегатами автоматических линий в массовом производстве жесткая, характеризуется отсутствием межоперационных заделов. Остановка одного из агрегатов автоматически останавливает всю линию. Оценка времени сохранения работоспособности – безотказности работы позиции с жесткой межагрегатной связью является комплексным и требует оценки многих факторов. В работе для проведения расчета была применена структурная схема надежности. Проведенный расчет показателей работоспособности и надежности рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью позволяет получить показатели надежности для второго направления развития перекомпоновываемых рабочих позиций с автоматической сменой узлов без нарушения жесткой межагрегатной связи базовых узлов. Отмечено, что при расчете можно не учитывать вероятность возникновения отказа агрегатных узлов по причине простоты их конструкции. При этом определение общей формулы вероятности безотказной работы рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью позволяет перейти к определению вероятности безотказной работы элементов рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью. Обеспечение гибкости автоматических производственных линий массового производства возможно при переходе от систем с жесткой межагрегатной связью к системам с рабочими позициями переменной компоновки со сменными модулями. Математическое обеспечение расчета надежности систем с жесткой межагрегатной связью позволит расширить область применения концепций «Индустрии 4.0» и «умного» производства.

*Ключевые слова:* структурная схема надежности, вероятность безотказной работы рабочей позиции, жесткая межагрегатная связь, автоматическая смена узлов, определение вероятности безотказной работы агрегатных узлов.

### Введение

Известно [1, 2], что безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки [3–6].

Вероятность безотказной работы рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью РПЖ ( $P(t)_{\text{РПЖ}}$ ) зависит от вероятности безотказной работы агрегатных узлов для всех ярусов компонования рабочей позиции [7]. Для определения влияния агрегатных узлов на  $P(t)_{\text{РПЖ}}$  и вывода общей формулы расчета  $P(t)_{\text{РПЖ}}$  используем структурную схему надежности (ССН) [8, 9].

### 1. Структурная схема надежности

При построении ССН каждый агрегатный узел РПЖ обозначается отдельным структурным блоком. В зависимости от влияния отказа агрегатного узла структурные блоки ставятся последовательно или параллельно. Если отказ агрегатного узла приводит к отказу всей рабочей позиции, то структурный блок агрегатного узла ставится последовательно (рис. 1, а). Вероятность безотказной работы рабочей позиции со ССН, имеющий вид последовательно соединенных структурных блоков агрегатных узлов, находится как произведение вероятностей безотказной работы составляющих агрегатных узлов [8, 9]:

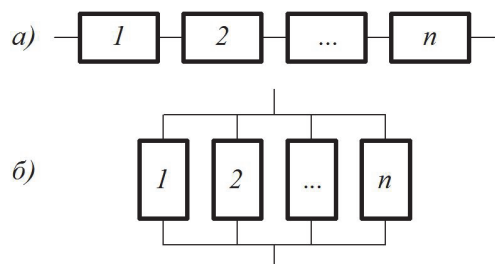


Рис. 1. Структурная схема надежности (СН) при последовательной (а) и параллельной (б) расстановке элементов

$$P(t) = P(t)_{э1} \cdot P(t)_{э2} \cdot \dots \cdot P(t)_{эn} = \prod_1^n P(t)_{эi}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество агрегатных узлов в комплекте рабочей позиции;  $P(t)_{эi}$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го агрегатного узла.

Параллельно расположенные структурные блоки (рис. 1, б) описывают ССН, имеющую группу агрегатных узлов, вызывающих отказ РП только в случае отказа всей группы агрегатных узлов [10–13]. Вероятность безотказной работы ССН с параллельно расположенными структурными блоками находится по формуле [14]:

$$P(t) = 1 - \prod_1^n (1 - P(t)_{эi}), \quad (2)$$

где  $n$  – количество агрегатных узлов;  $P(t)_{эi}$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го агрегатного узла.

## 2. Расчет вероятности безотказной работы

Для проведения расчетов вероятности безотказной работы рабочей позиции производственной системы с жесткой межагрегатной связью ( $P(t)_{РПЖ}$ ) необходимо дифференцировать (разбить) компоновку РПЖ на составные агрегатные узлы [15, 16] и в соответствии со ССН составить общую формулу вероятности безотказной работы РПЖ ( $P(t)_{РПЖ}$ ).

РПЖ состоит из  $n$  комплектов, отказ каждого комплекта приводит к отказу всей РП, следовательно, формула расчета  $P(t)_{РПЖ}$  записана следующим образом:

$$P(t)_{РПЖ} = P(t)_{k1} \cdot \dots \cdot P(t)_{kn} = \prod_1^n P(t)_{ki}, \quad (3)$$

где  $P(t)_{ki}$  – вероятность безотказной работы  $k$ -го комплекта РПЖ;  $i$  – порядковый номер комплекта РПЖ;  $n$  – количество комплектов в составе рабочей позиции.

Вероятность безотказной работы  $k$ -комплекта определяется вероятностью безотказной работы агрегатных узлов ярусов, из которых скомпонован  $k$ -й комплект [17, 18]. Учитывая, что независимо от комплекта отказ любого из ярусов приводит к отказу всей РПЖ, формула расчета вероятности безотказной работы  $k$ -комплекта РПЖ ( $P(t)_{ki}$ ) записывается:

$$P(t)_{ki} = P(t)_{я1} \cdot \dots \cdot P(t)_{ян} = \prod_1^m P(t)_{yj}, \quad (4)$$

где  $P(t)_{яi}$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го яруса РПЖ;  $j$  – порядковый номер яруса РПЖ;  $m$  – количество ярусов  $k$ -го комплекта РПЖ.

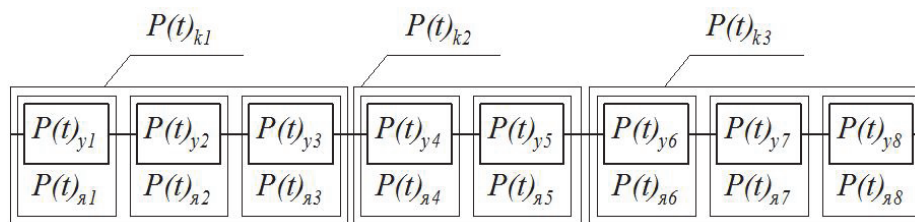
Вероятность безотказной работы яруса РПЖ определяется вероятностью безотказной работы узлов, установленных на данном ярусе. Так как ярусы РПЖ всегда состоят из одного агрегатного узла [19, 20], то вероятность безотказной работы яруса будет равна вероятности безотказной работы агрегатного узла, работающего на этом ярусе ( $P(t)_{yj}$ ).

Согласно проведенному анализу строим структурную схему надежности рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью (ССН РПЖ; рис. 2).

Используя ССН, составляем общую формулу вероятности безотказной работы рабочей позиции ( $P(t)_{РПЖ}$ ):

$$P(t)_{РПЖ} = \prod_1^n \left( \prod_1^m P(t)_{yj} \right) = \prod_1^n \left( \prod_1^m P(t)_{yj} \right) = \prod_1^q P(t)_{yj}, \quad (5)$$

где  $q$  – количество агрегатных узлов жесткой компоновки РПЖ;  $n$  – количество комплектов на рабочей позиции РПЖ;  $m$  – количество ярусов  $i$ -го комплекта РПЖ;  $P(t)_{yj}$  – вероятность безотказной работы  $j$ -го яруса РПЖ.



**Рис. 2.** Структурная схема надежности рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью (ССН РПЖ):  $P(t)_{y1}$ ,  $P(t)_{y4}$ ,  $P(t)_{y6}$  – вероятности безотказной работы станин;  $P(t)_{y2}$ ,  $P(t)_{y7}$  – вероятности безотказной работы силовых столов;  $P(t)_{y3}$ ,  $P(t)_{y1}$ ,  $P(t)_{y8}$  – вероятности безотказной работы шпиндельных узлов

При расчете по формуле (5) следует учитывать, что вероятность возникновения отказа ( $F(t)$ ) агрегатных узлов типа станины по причине простоты конструкции, жесткого соединения и отсутствия кинематических пар близка к нулю ( $F(t) \rightarrow 0$ ;  $P(t) \rightarrow 1$ ). Соответственно, нетрудно заметить по формуле (5), что вероятность безотказной работы, равная единице, не влияет на  $P(t)_{РПЖ}$ , следовательно, вероятность безотказной работы станин  $P(t)_{y1}$ ,  $P(t)_{y4}$ ,  $P(t)_{y6}$  в формуле (5) можно опустить.

#### Выводы

Таким образом, расчет показателей работоспособности и надежности рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью позволяет проводить расчет показателей надежности для второго направления развития перекомпоновываемых рабочих позиций с автоматической сменой узлов без нарушения жесткой межагрегатной связи базовых узлов.

Определение общей формулы вероятности безотказной работы рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью позволяет перейти к определению вероятности безотказной работы элементов рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью (агрегатных узлов).

#### Обсуждение и применение

Обеспечение гибкости автоматических производственных линий массового производства возможно при переходе от систем с жесткой межагрегатной связью к системам с рабочими позициями переменной компоновки со сменными модулями. Перекомпоновываемые рабочие позиции самоконтролируемы и саморегулируемы, что соответствует концепциям «цифрового» и «умного» производства. Полученный математический аппарат формирует части научного задела для данного перехода.

#### Литература

1. Волчкевич, Л.И. Надежность автоматических линий / Л.И. Волчкевич. – М.: Машиностроение, 1969. – 309 с.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
3. Хазов, Б.Ф. Управление надежностью машин и технологических систем на этапах их жизненного цикла. Ч. 1: Этапы разработки технологического задания, технологического предложения, технического проекта: учеб. пособие / Б.Ф. Хазов. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2007. – 184 с.
4. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
5. Баронс, П.П. Надежность и качество механических систем / Баронс П.П. – Рига: Авотс, 1982. – 86 с.
6. Надежность технических систем: справ. / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1986. – 608 с.
7. The Modelling Of Basing Holes Machining Of Automatically Replaceable Cubical Units For Reconfigurable Manufacturing Systems With Low-Waste Production / N.M. Bobrovskij, D.G. Levashkin, I.N. Bobrovskij, P.A. Melnikov, A.A. Lukyanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 50. – P. 012013.

8. Бортников, С.П. *Научный аппарат надежности: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Основы теории надежности и диагностика»* / С.П. Бортников. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 17 с.
9. Горшков, Б.М. *Методы диагностирования технических систем* / Б.М. Горшков, А.Е. Кергин, Г.Д. Ржевцев // Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в сервисе». – СПб.: Изд-во СПбГУСЭ, 2012. – С. 148–149.
10. Бобровский, Н.М. *Определение площади износа рабочей поверхности деталей машин и инструментов* / Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский // Вектор науки ТГУ. – 2009. – № 1 (4). – С. 17–23. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=12905457> (дата обращения: 23.08.2016).
11. Царев, А.М. *Перекомпоновываемые производственные системы - перспективное направление развития машиностроения* / А.М. Царев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2007. – 156 с.
12. Левашкин, Д.Г. *Системы автоматического контроля: учеб. пособие* / Д.Г. Левашкин. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2007. – 163 с.
13. Горецкий, Е.В. *К вопросу автоматизации технической диагностики тяжелых фрезерных станков* / Е.В. Горецкий, Ю.В. Кирилин, В.В. Мелентьев // Адаптация, моделирование и диагностика систем. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – С. 121.
14. Диллон, Б. *Инженерные методы обеспечения надежности систем* / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
15. Базров, Б.М. *Единый подход в построении расчетных моделей изделия как механической системы* / Б.М. Базров // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 5. – С. 3–13.
16. Мельников, П.А. *Математическая модель формирования микрорельефа шейки вала при обработке алмазным выглаживанием* / П.А. Мельников, А.Н. Пахоменко, А.А. Лукьянов // Вектор науки Тольятт. гос. ун-та. – 2015. – № 2-2. – С. 104–111.
17. Grigoriev, S.N. *The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems* / S.N. Grigoriev, G.M. Martinov // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 41. – P. 858–863. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.031
18. *A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises* / S.N. Grigor'ev, V.A. Dolgov, A.V. Krasnov et al. // Russian Aeronautics – 2015. – Vol. 58, no. 2. – P. 244–250. DOI: 10.3103/S106879981502018X
19. Волчкевич, Л.И. *Автоматы и автоматические линии. Ч. 1: Основы проектирования* / Л.И. Волчкевич; под ред. Г.А. Шаумяна. – М.: Высш. шк., 1976. – 230 с.
20. *Алгоритм расчета параметров микрогеометрии рабочей поверхности гильзы блока цилиндров при платовершинном хонинговании* / О.О. Левицких, А.А. Лукьянов, В.П. Табаков и др. // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 4 (6). – С. 1315–1319.

**Горшков Борис Михайлович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем», Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти, [kaf\\_ekis@tolgas.ru](mailto:kaf_ekis@tolgas.ru).

**Бобровский Игорь Николаевич**, кандидат технических наук, заместитель директора института химии и инженерной экологии, Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти; научный сотрудник отдела металлофизики и авиационных материалов, Самарский научный центр РАН, г. Самара, [bobri@yandex.ru](mailto:bobri@yandex.ru).

**Самохина Наталья Станиславовна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационный и электронный сервис», Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти, [kaf\\_ekis@tolgas.ru](mailto:kaf_ekis@tolgas.ru).

**Савельев Александр Викторович**, магистрант, Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, [SavelievA-86@mail.ru](mailto:SavelievA-86@mail.ru).

*Поступила в редакцию 11 мая 2018 г.*

## OPERATION POSITION WITH RIGID INTER-AGGREGATE CONNECTION

**B.M. Gorshkov**<sup>1</sup>, *kaf\_ekis@tolgas.ru*,  
**I.N. Bobrovskij**<sup>2, 3</sup>, *bobri@yandex.ru*,  
**N.S. Samokhina**<sup>1</sup>, *kaf\_ekis@tolgas.ru*,  
**A.V. Saveliev**<sup>2</sup>, *SavelievA-86@mail.ru*

<sup>1</sup>Volga Region State University of Service, Togliatti, Russian Federation,

<sup>2</sup>Togliatti State University, Russia, Togliatti, Russian Federation,

<sup>3</sup>Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russian Federation

A modern competitive engineering enterprise must provide an effective switching between nomenclature types. This trend underlies the strategy of scientific and technological development of the Russian Federation in terms of priority which is given to digitalization of production. Reconfiguration of automatic mass production lines is most resource intensive due to a variety of operation positions. The connection between automatic line aggregates in mass production is rigid and is characterized by the absence of inter-operational reserves. Shutdown of one aggregate automatically stops the entire line. Estimation of operating capacity time, i.e. operational safety of a position with a rigid inter-aggregate connection, requires estimation of many factors. In this paper, we applied a flow chart of reliability to calculation. The calculation of indices of operating capacity and reliability of operation position with a rigid inter-aggregate connection makes it possible to obtain reliability indices for the second line of development of recomposed operation positions with automatic node change without breaking the rigid inter-aggregate connection between the basic nodes. It was noted that when calculating it is possible to ignore the probability of failure of aggregate nodes due to the simplicity of their design. Moreover, determination of the general formula for the probability of operational safety of an operation position with a rigid inter-aggregate connection allows us to determine the probability of operational safety of the operation position elements with a rigid inter-aggregate connection. The flexibility of automatic production lines of mass production can be provided when switching from systems with rigid inter-aggregate connection to systems with operation positions of variable configuration with plug-in modules. Mathematical support for calculating the reliability of systems with rigid inter-aggregate connection will expand the applicability of “Industry 4.0” and “smart” production concepts.

*Keywords: flow chart of reliability, probability of operational safety of operation positions, rigid inter-aggregate connection, automatic node change, determination of the probability of operational safety of modular units.*

### References

1. Volchkevich L.I. *Nadezhnost' avtomaticheskikh linij* [Reliability of automatic lines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 309 p.
2. *GOST 27.002-89. Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opreleniya* [State Standard 27.002-89, Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 1990. 37 p.
3. Khazov B.F. *Upravlenie nadezhnost'yu mashin i tekhnologicheskikh sistem na etapah ih zhiznennogo tsikla. CH. 1: Ehtapy razrabotki tekhnologicheskogo zadaniya, tekhnologicheskogo predlozheniya, tekhnicheskogo proekta* [Management of reliability of machines and technological systems at the stages of their life cycle. Part 1: Stages of the development of the technological assignment, technological proposal, technical project]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 184 p.
4. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh system* [Reliability and security of structurally complex systems]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2000. 248 p.
5. Barons P.P. *Nadezhnost' i kachestvo mekhanicheskikh system* [Reliability and quality of mechanical systems]. Riga, Avots Publ., 1982. 86 p.

6. Ushakov I.A. (Ed.) *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 608 p.
7. Bobrovskij N.M., Levashkin D.G., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A., Lukyanov A.A. The Modeling Of Basing Holes Machining Of Automatically Replaceable Cubical Units For Reconfigurable Manufacturing Systems With Low-Waste Production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 50, pp. 012013.
8. Bortnikov S.P. *Nauchnyy apparat nadezhnosti: metodicheskiye ukazaniya k laboratornym rabotam po distsipline "Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika"* [Scientific apparatus of reliability: methodical instructions to laboratory works on the discipline "Fundamental of the reliability theory and diagnostics"]. Ulyanovsk, 2006. 17 p.
9. Gorshkov B.M., Kergin A.E., Rzhnevcev G.D. [Methods for diagnosing of technical]. *Conference proceedings of the III International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Service"*. St. Petersburg, St. Petersburg St. Univ. of Service and Economics Publ., 2012, pp. 148–149.
10. Bobrovskiy N.M., Melnikov P.A., Bobrovskiy I.N. [Definition of deterioration area on machine component and tools]. *Vector of science TSU*, 2009, vol. 1 (4), pp. 17–23. (in Russ.)
11. Carev A.M. *Perekomponuemye proizvodstvennyye sistemy – perspektivnoe napravlenie razvitiya mashinostroeniya* [Recomposed production systems – a promising direction in the development of mechanical engineering]. Togliatti, 2007. 156 p.
12. Levashkin D.G. *Sistemy avtomaticheskogo kontrolya* [Automatic control systems]. Togliatti, 2007. 163 p.
13. Goreckij E.V., Kirilin YU.V., Melent'ev V.V. [To the issue of automation of technical diagnostics of heavy milling machines]. *Adaptation, modeling and diagnostics of systems, Kujbyshev*, 1983, p. 121. (in Russ.)
14. Dillon B., Singh Ch. *Inzhenernye metody obespecheniya nadezhnosti sistem* [Engineering methods for ensuring the reliability of systems]. Moscow, Mir Publ., 1984. 318 p.
15. Bazrov B.M. [A unified approach in the construction of model product models as a mechanical system]. *Assembly in mechanical engineering and instrument making*, 2009, vol. 5, pp. 3–13. (in Russ.)
16. Melnikov P.A., Pakhomenko A.N., Lukyanov A.A. Mathematical model of forming of microrelief of shaft journal while processing by diamond burnishing. *Vector of science TSU*, 2015, vol. 2-2, pp. 104–111. (in Russ.)
17. Grigoriev S.N., Martinov G.M. The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 858–863. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.031
18. Grigor'ev S.N., Dolgov V.A., Krasnov A.V., Kabanov A.A., Andreev N.S. A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58 (2), pp. 244–250. DOI: 10.3103/S106879981502018X
19. Volchkevich L.I.; Shaumyan G.A. (Ed.) *Avtomaty i avtomaticheskie linii* [Automatic machines and automatic lines. Part 1: Principles of design]. Moscow, Higher School, 1976. 230 p.
20. Levitskih O.O., Lukyanov A.A., Tabakov V.P., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A., Bobrovskij N.M. [Algorithm for calculating the microgeometry parameters of the working surface of the cylinder liner in plateau honing processing]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4 (6), pp. 1315–1319. (in Russ.)

**Received 11 May 2018**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Рабочая позиция с жесткой межагрегатной связью / Б.М. Горшков, И.Н. Бобровский, Н.С. Самохина, А.В. Савельев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 45–50. DOI: 10.14529/engin180205

### FOR CITATION

Gorshkov B.M., Bobrovskij I.N., Samokhina N.S., Saveliev A.V. Operation Position with Rigid Inter-Aggregate Connection. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 45–50. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180205