

УДК 621.867.212.3

*Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов*

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫМ КОНВЕЙЕРОМ**

*Yu.N. Kozhubaev, I.M. Semenov*

### **CONTROL SYSTEMS FOR BELT CONVEYORS**

В статье выбран способ управления ленточными конвейерами с целью повысить их надежность. Определены входные и выходные лингвистические переменные, сформированы базы правил систем нечеткого вывода, построены графики терм-множеств входных и выходных лингвистических переменных с функциями принадлежности, реализован алгоритм Мамдани в качестве алгоритма нечеткого вывода, получена поверхность нечеткого вывода для системы нечеткого управления. С помощью специального пакета расширений Fuzzy Logic Toolbox в программной среде Matlab/Simulink разработана модель системы нечеткого управления. Доказана эффективность разработанной модели системы нечеткого управления, которая может быть использована при проектировании и эксплуатации многоприводных ленточных конвейеров.

ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР; НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; ПРИВОД; НАДЕЖНОСТЬ; АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ; КОНВЕЙЕРНАЯ ЛЕНТА.

Chosen method of controlling the conveyor belt in order to improve its reliability. Defined input and output linguistic variables, formed the rule base of fuzzy inference systems, the graphs of the term-sets of input and output linguistic variables with the membership functions, the algorithm is implemented as a Mamdani fuzzy inference algorithm, the surface obtained fuzzy inference system for fuzzy control. With a special extension package Fuzzy Logic Toolbox in the software Matlab / Simulink simulation model is developed fuzzy control system. The efficacy of the developed model of fuzzy control, which can be used in the design and operation of multi-drive tape conveyors.

CONVEYOR SYSTEM; FUZZY LOGIC CONTROL SYSTEM; DRIVERS; RELIABILITY; EMERGENCY MODE; CONVEYOR BELT.

Конвейерный транспорт на шахтах, карьерах, рудниках, объектах подземного строительства получает все более широкое распространение вследствие существенных его преимуществ перед другими видами транспорта, обеспечивающих наибольшую технико-экономическую эффективность.

Вместе с тем становится все более очевидной необходимость обеспечения достаточной надежности ленточных конвейеров, т. к. снижение их надежности уменьшает пропускную способность всего технологического процесса

и уменьшает машинное время работы ленточных конвейеров. Снижение машинного времени работы ленточных конвейеров по мере снижения их надежности подтверждается данными, полученными в работе [1]. Как правило, аварийность работы ленточных конвейеров проявляется в потере устойчивости ленты на приводных барабанах (в проскальзывании ленты относительно приводных барабанов). Такой аварийный режим работы ленточных конвейеров принято называть пробуксовкой. Пробуксовка ленты на приводных барабанах ленточных конвейеров

является причиной простоев [2] и возникновения пожаров [3], сопровождаемых большими убытками, а иногда и человеческими жертвами.

В большинстве случаев пробуксовка ленты на приводных барабанах вызвана неравномерным распределением нагрузки между приводными барабанами в ленточных конвейерах. На перераспределение нагрузки влияют следующие возмущающие факторы: изменение радиусов приводных барабанов (износ, загрязнение); различная толщина верхней и нижней обкладок ленты, изменение упругости ленты; изменение общего тягового усилия и прочие факторы. Возможен режим, когда только один из приводных барабанов ведет ленту без пробуксовки, а на втором наблюдается существенная разница между линейной скоростью обода барабана и скоростью ленты. Подобный аварийный режим работы недопустим.

Поэтому цель данной работы — повышение надежности ленточных конвейеров за счет обеспечения равномерного распределения нагрузки между приводными барабанами, исключающее возможность пробуксовки ленты.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) выбрать способ обеспечения равномерного распределения нагрузки между приводными барабанами, при котором возможность пробуксовки была бы исключена;
- 2) разработать модель системы автоматического управления ленточным конвейером для реализации выбранного способа;
- 3) доказать эффективность разработанной модели системы автоматического управления ленточным конвейером и возможность ее использования, при проектировании и эксплуатации ленточных конвейеров.

Вопросы обеспечения надежной работы ленточных конвейеров рассмотрены в работах [4, 5]. Авторами предложена система автоматического управления натяжением ленты. Основной принцип работы заключается в том, что информация о натяжении сбегающей ветви ленты  $S_{сб}$ , которое измеряется датчиком натяжения, поступает в блок управления, где сравниваются фактическое  $S_{сб}$  и заданное  $S_{сз}$  натяжения, а усиленный сигнал, соответствующий разности этих значений, формирует сигнал по управлению приводом натяжного устройства. Данный способ

имеет существенные недостатки. Увеличение общего натяжения может привести к снижению долговечности и даже к обрыву ленты.

Условие отсутствия пробуксовки ленты относительно приводного барабана можно записать в виде [6]

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} \leq e^{\mu\alpha}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент сцепления ленты с приводным барабаном;  $S_{нб}$  и  $S_{сб}$  — натяжения ленты соответственно в точках набегания и сбегаания с приводного барабана;  $\alpha$  — угол обхвата лентой приводного барабана;  $e^{\mu\alpha}$  — тяговый фактор приводного барабана.

Для обеспечения безаварийного режима работы ленточного конвейера предлагается введение коэффициента запаса по тяговому фактору  $K_{T\max} > 1$ . Получено выражение

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} \leq \frac{e^{\mu\alpha}}{K_{T\max}}. \quad (2)$$

Для того чтобы обеспечить реализацию тяговых усилий, для каждого приводного барабана принято выбирать двигатели соответствующей мощности [7]. К примеру, мощность двигателей для ленточного конвейера с двумя приводами выбирается по формулам

$$N_1 = \frac{W_1 v_1}{1000 \eta_1} \quad (3)$$

и

$$N_2 = \frac{W_2 v_2}{1000 \eta_2}, \quad (4)$$

где  $N_1, N_2$  — мощности двигателей;  $v_1$  и  $v_2$  — скорости ленты на приводных барабанах;  $W_1, W_2$  — расчетные максимальные тяговые усилия приводных барабанов.

В процессе эксплуатации возможен износ ленты и футеровки на приводных барабанах, из-за которого могут изменяться значения тяговых усилий, что приводит к перераспределению нагрузок между барабанами и, как результат, создает предпосылки для аварийного режима работы конвейера. Таким образом, получается, что уже при расчетах и проектировании закладывается такое соотношение мощностей между приводами, при котором нагрузка на двигатели была бы неодинакова.

Данную проблему можно решить путем автоматического регулирования величины коэффициента распределения нагрузки —  $k_p$ .

Оптимальным значением коэффициента распределения нагрузки может быть такое значение  $k_p$ , при котором коэффициент запаса по тяговой способности  $K_{T\max}$  каждого приводного барабана с увеличением нагрузки исчерпывался бы равномерно, а величина коэффициента распределения нагрузки на приводах была бы пропорциональна характеристикам уже выбранных приводов с учетом окружных скоростей на каждом из приводных барабанах.

Тогда получаем следующую формулу:

$$k_p = \frac{S_{нб1}}{S_{сб1}} = \frac{S_{нб2}}{S_{сб2}} = K_{T\max}. \quad (5)$$

Также из формулы (2) получаем

$$\frac{e^{\mu\alpha} S_{сб}}{S_{нб}} \geq K_{T\max}. \quad (6)$$

Условия работы ленточного конвейера при отсутствии пробуксовки могут быть выражены формулами (7) и (8). Реализация этих условий может быть достигнута путем автоматического регулирования распределения величины моментов  $M_1$  и  $M_2$  на приводах. Отметим, что все изложенное справедливо для ленточных конвейеров с любым числом приводов.

Наиболее подходящими для реализации автоматического управления ленточными конвейерами являются системы нечеткого управления с нечетким регулятором. Основные преимущества системы нечеткого управления перед другими системами: значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании нечетких контроллеров; возможность создания систем управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики; повышение точности алгоритмов фильтрации случайных возмущений при обработке информации от датчиков.

Принцип системы нечеткого управления базируется на теории нечетких множеств, основные идеи которой были предложены американским математиком Лотфи Заде [8, 9] и позволяют описывать качественные, неточные понятия и знания об окружающем мире, а также оперировать этими знаниями с целью получения новой информации. При разработке и моделировании системы нечеткого управления используем программную среду MATLAB. Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде

MATLAB предназначен специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox, который позволяет выполнять необходимые действия с нечеткими моделями.

Для реализации нечеткого управления необходимо сформировать эвристические правила. С учетом экспериментальных данных предложены следующие эвристические правила:

1) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  меньше нормы, а  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

2) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  в пределах нормы и  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

3) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  больше нормы, а  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

4) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  в пределах нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

5) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  меньше нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует уменьшить  $M_2/M_1$ ;

6) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  больше нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует увеличить  $M_2/M_1$ .

В качестве входных лингвистических переменных выбираем  $f_1 - K_{T1}/K_{T2}$ ,  $f_2 - K_{T\max}$ , в качестве выходной  $f_3 - M_2/M_1$ . Тогда получим следующие правила:

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $L1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $N1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_3: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $R1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_4: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $N1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_5: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $L1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $L3$ ».

ПРАВИЛО\_6: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $R1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $R3$ ».

В качестве терм-множеств первой лингвистической переменной  $f_1$  будем использовать множество  $T_1 = \{\text{«меньше нормы»}, \text{«норма»}, \text{«больше нормы»}\}$ , или в символическом виде  $T_1 = \{L_1, N_1, R_1\}$  с функциями принадлежности, изображенными на рис. 1, а. В качестве терм-множества второй лингвистической переменной будем использовать множество  $T_2 = \{\text{«меньше нормы»}, \text{«норма»}\}$ , или в символическом виде  $T_2 = \{L_2, N_2\}$  с функциями принадлежности,

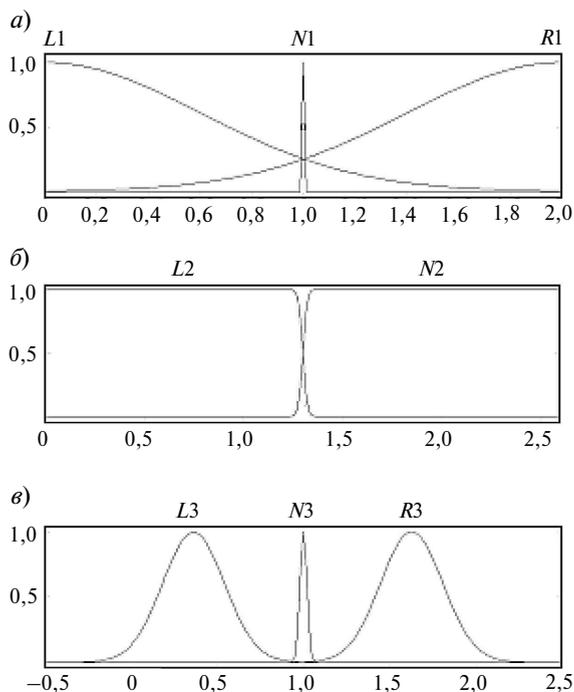


Рис. 1. Графики функций принадлежности лингвистических переменных терм-множеств

изображенными на рис. 1, б. В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной будем использовать множество  $T_3 = \{\text{«уменьшить момент } M_2 \text{ относительно } M_1\text{»}, \text{«оставить момент } M_2 \text{ равным } M_1\text{»}, \text{«увеличить момент } M_2 \text{ относительно } M_1\text{»}\}$ , или в символическом виде  $T_3 = \{L_3, N_3, R_3\}$  с функциями принадлежности, изображенными на рис. 1, в.

В качестве алгоритма выбираем алгоритм Мамдани, который нашел широкое применение в системах нечеткого вывода.

Следующий этап нечеткого вывода — активизация заключений в нечетких правилах продукций.

Аккумуляция заключений нечетких правил продукций с использованием операции максимизации приводит к получению нечеткого множества. Дефаззификация выходных лингвистических переменных методом центра площади для значений функции принадлежности приводит к получению значения управляющей переменной, равной величине изменения  $M_2/M_1$ . Это значение и есть результат решения задачи нечеткого вывода для текущих значений входных величин.

Для общего анализа разработанной модели нечеткого управления может оказаться полезной визуализация полученной поверхности нечеткого вывода (рис. 2). Поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной лингвистической переменной от значений входных лингвистических переменных нечеткой модели системы управления ленточным конвейером. Эта зависимость может послужить основой для программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма управления в форме таблицы решений. В дополнение к этому установление данной зависимости является, по сути, решением задачи, известной в классической теории управления как задача синтеза управляющих воздействий. При этом для ее решения использованы средства нечеткой логики и теории нечетких множеств.

Отметим, что все написанное выше можно распространить на ленточные конвейеры с любым числом приводов. Если число приводных барабанов более двух, то следует рассматривать последовательно каждую пару, причем один и тот же приводной барабан в одной паре будет первым, а в соседней этот же барабан будет вторым.

Для реализации разработанной нечеткой модели используем разработанную имитационную

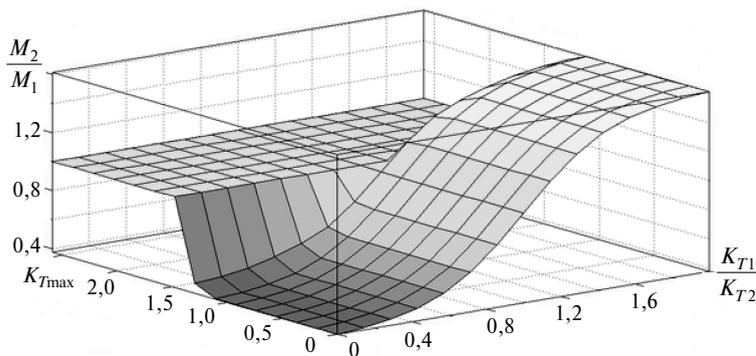


Рис. 2. Поверхность нечеткого вывода

модель ленточного конвейера в программной среде Matlab/Simulink [10]. Параметры выбранного ленточного конвейера близки к параметрам конвейеров, используемых при строительстве подземных сооружений для проходки тоннелей; о чем говорят следующие данные:

Длина конвейера, $L$ , м .....	3900
Ширина ленты, $H_L$ , мм .....	1000
Тип конвейера .....	Туннельный
Высота подъема, $H_L$ , м .....	64
Транспортируемый материал .....	Суглинок, торф и песок
Плотность материала, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....	1667
Производительность, $Q_{\max}$ , т/ч .....	1000
Скорость движения ленты, $v$ , м/с .....	3,5
Мощность двигателей, $N_p$ , кВт .....	5×160
Тип привода .....	Конический мотор-редуктор с частотным регулятором

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований работы имитационной модели ленточного конвейера в режиме пуска незагруженного конвейера (с 0 по 7 секунды), при работе конвейера с установившейся скоростью ленты 3,5 м/с и производительностью 1000 т/ч (с 7 по 200 секунды), при остановке конвейера (с 200 по 207 секунды) и при пуске уже загруженного конвейера (с 230 по 240 секунды).

На рис. 3, *a* и *б* — результаты моделирования работы имитационной модели ленточного конвейера с моделью системы нечеткого управления (рис. 3, *a*) и без нее (рис. 3, *б*). Видно, что с помощью разработанной системы нечеткого управления удалось существенно увеличить коэффициент запаса по тяговой способности, что повышает надежность ленточного конвейера.

Таким образом, в рамках статьи выбран способ управления ленточными конвейерами с целью повысить их надежность. Определены входные и выходные лингвистические переменные, сформированы базы правил систем нечеткого вывода, построены графики терм-множеств входных и выходных лингвистических переменных с функциями принадлежности, реализован алгоритм Мамдани в качестве алгоритма нечеткого вывода, получена поверхность нечеткого вывода для системы нечеткого управления. С помощью специального пакета расширений Fuzzy Logic Toolbox в программной среде Matlab/Simulink разработана модель системы нечеткого управления. Доказана эффективность разработанной модели системы нечеткого управления, которая может быть использована при проектировании и эксплуатации многоприводных ленточных конвейеров.

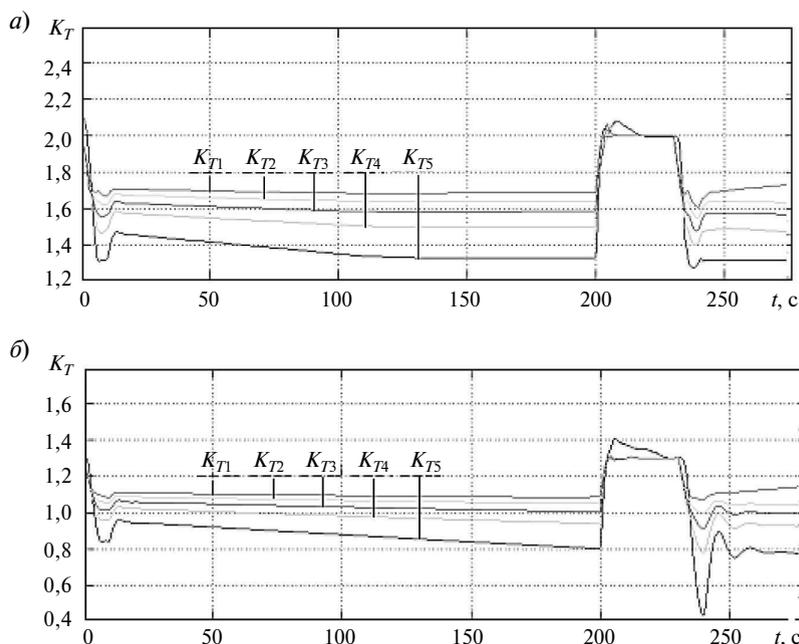


Рис. 3. Графики изменения коэффициентов запаса по тяговой способности на приводных барабанах

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян С.А.**, Проблемы надежности конвейерного транспорта угольных шахт. СПб.: Изд-во СПбГТУ «Горный», 2004. 182 с.
2. **Волоткинский В.С., Кармаев Г.Д., Драя М.И.** Выбор оборудования карьерного конвейерного транспорта. М.: Недра, 1990. 192 с.
3. **Буткий Н.В., Белик И.П., Маркович Ю.М.** Пожарная безопасность подземных ленточных конвейеров // Безопасность труда в промышленности. 1988. №7. С. 44–45.
4. **Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г.** Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
5. **Шахмейстер Л.Г., Солод Г.И.** Подземные конвейерные установки / Под ред. чл.-кор. АН СССР А.О.Спиваковского. М.: Недра, 1976. 432 с.
6. **Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е.** Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: Изд-во МГГУ, 2005. 543с.
7. **Ромакин Н.Е.** Машины непрерывного транспорта: учеб. пособие для студ. Высш. учеб. заведений. М.: Изд-во центр «Академия», 2008. 432с.
8. **Zade L.A.** Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
9. **Zade L.A.** Fuzzy logic // *IEEE Transactions on Computers*. 1988, Vol. 21, № 4, P. 83–93.
10. **Кожубаев Ю.Н., Прокофьев О.В., Семенов И.М.** Имитационная модель ленточного конвейера. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №3(130). С. 116–121.

## REFERENCES

1. **Khachatryan S.A.** Problemy nadezhnosti konveyernogo transporta ugolnykh shakht. SPb.: Izd-vo SPbGTU «Gornyy», 2004. 182 s. (rus.)
2. **Volotkinskiy V.S., Karmayev G.D., Draya M.I.** Vybor oborudovaniya karyernogo konveyernogo transporta. M.: Nedra, 1990. 192 s. (rus.)
3. **Butkiy N.V., Belik I.P., Markovich Yu.M.** Pozharnaya bezopasnost podzemnykh lentochnykh konveyerov. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 1988. №7. S. 44–45. (rus.)
4. **Shakhmeyster L.G., Dmitriyev V.G.** Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov. M.: Mashinostroyeniye, 1987 336 s. (rus.)
5. **Shakhmeyster L.G., Solod G.I.** Podzemnyye konveyernyye ustanovki / Pod red. chl.-kor. AN SSSR A.O.Spivakovskogo. M.: Nedra, 1976. 432 s. (rus.)
6. **Galkin V.I., Dmitriyev V.G., Dyachenko V.P., Zapenin I.V., Sheshko Ye.Ye.** Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornnykh predpriyatiy. M.: Izd-vo MGGU, 2005. 543 s. (rus.)
7. **Romakin N.Ye.** Mashiny nepreryvnogo transporta: ucheb. posobiye dlya stud. Vyssh. ucheb. zavedeniy. M.: Izd-vo tsentr «Akademiya», 2008. 432 s. (rus.)
8. **Zade L.A.** Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.,
9. **Zade L.A.** Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*, 1988. Vol. 21, № 4, P. 83–93. (rus.)
10. **Kozhubayev Yu.N., Prokofyev O.V., Semenov I.M.** Imitatsionnaya model lentochnogo konveyera. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2011. №3(130). S. 116–121. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОЖУБАЕВ Юрий Нургалевич** — аспирант кафедры систем и технологий управления института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.21, Россия; e-mail: um-urii@rambler.ru

**СЕМЁНОВ Игорь Михайлович** — кандидат технических наук профессор кафедры систем и технологий управления института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21, Россия; e-mail: semenov@saugtu.nord.nw.ru

## AUTHOR

**KOZHUBAEV Yurii N.** — St.-Petersburg state polytechnical University. 194021, St.-Petersburg, street Polytechnical, 21, Russia, tel.:89112502000 e-mail: um-urii@rambler.ru

**SEME NOV Igor M.** — St.-Petersburg state polytechnical university. 194021, St.-Petersburg, street Polytechnical, 21, Russia; tel.: e-mail: semenov@saugtu.nord.nw.ru