

Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry. (St.-Petersburg, Russia, 2001): 412–417. Print. 2. Shkol'nikov E. Ya. "Sil'notochniy uskoritel' elektronov mikrosekundnoy dlitel'nosti dlya radiacionno-tehnologicheskikh tsely." Tr. XI Megdunarodnogo sovetshaniya primeneniya uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine. (St.-Petersburg, Russia, 2005): 126–128. Print. 3. Bistrov P. A. and N. E. Rozanov. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronnoy puchka s shirokim energeticheskim spektrom." VANT. No. 4, 80. 2012. 87–91. Print. 4. Dovbnya A. N., S. D. Lavrinenko and V. V. Zakutin. "Modifikatsiya poverhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki." VANT. Ser.:

Fizika radiacionnogo materialovedeniya. No. 2 (72), vip. 97. (2011). 39–45. Print. 5. Gluhii V. A., O. P. Pecherskiy, V. I. Engel'ko and B. P. Yacenko. "Modifikatsiya poverhnostnykh svoystv materialov s pomotsh'yu motshnih impul'snih elektronnykh puchkov." Sbornik dokladov X Megdunarodnogo sovetshaniya po primeneniyu uskoriteley zaryagennih chastic v promishlennosti i medicine. (St.-Petersburg, Russia, 2001): 445–447. Print. 6. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya. No. 732, vip. 2(30). 2006. 96–100. Print.

Поступила (received) 05.09.2015

Мазманишвили Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков; тел.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (067) 799-38-64; e-mail: mazmanishvili@gmail.com.

Решетняк Николай Григорьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков; тел.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

Reshetnyak Mikola Grygorovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, senior staff scientist National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv; tel.: (068) 953-84-01; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

Сидоренко Анна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (095) 392-54-39; e-mail: sau123@ukr.net.

Sydorenko Ganna Yuriyivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of analysis of the systems and management; tel.: (095) 392-54-39; e-mail: sau123@ukr.net.

Чертушцев Игорь Алексеевич – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», ведущий инженер, г. Харьков; тел.: (068) 992-96-32; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

Chertyshev Igor Oleksiyovych – National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", lead engineer, Kharkiv; tel.: (068) 992-96-32; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua.

УДК 621.3.078.001

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ ТАНКОВОЙ ЗЕНИТНОЙ УСТАНОВКИ

Рассматривается задача отыскания значений варьируемых параметров системы наведения танковой зенитной установки закрытого типа, в которой зенитный пулемет установлен на вращающейся командирской башенке, а наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования. Показано, что качество работы системы наведения оценивается точностью поддержания заданной угловой скорости наведения, быстротой и энергетическими затратами на наведение.

Ключевые слова: танковая зенитная установка, импульсная система регулирования, точность, быстротой, энергетические затраты на наведение.

Введение. В украинских танках Т-64БМ «Булат», Т-80УД «Берега» и Т-84 «Оплот» нашли применение зенитные установки закрытого типа [1,2]. Зенитный пулемет калибром 12,7 мм установлен на командирской башенке. Наведение пулемета на воздушные и наземные цели осуществляется из командирской башенки с помощью пульта наведения, связанного с электроприводом импульсного регулирования.

Схема электропривода танковой зенитной установки (ТЗУ) приведена на рис. 1, где приняты обозначения: КБ – командирская башенка; Р – редуктор; ИЭД – исполнительный электродвигатель; ТГ – тахогенератор обратной связи; ПН – пульт наведения; РН – реостат наведения; ЦЭБН – цифровой электронный блок наведения.

© Т. Е. Александрова, 2015

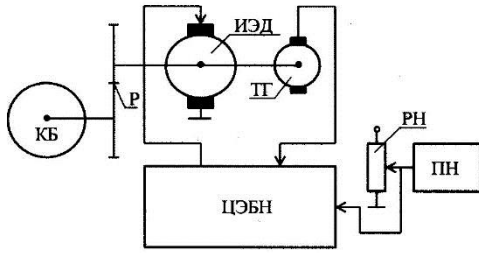


Рис. 1 – Электропривод наведения ТЗУ

ЦЭБН представляет собой широтно-импульсный модулятор (ШИМ) и формирует последовательность управляющих импульсов постоянной амплитуды U_0 , передние фронты которых отстоят друг от друга на величину T_0 :

$$U_y(t) = \begin{cases} U_0 \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t)], & kT_0 \leq t < (k + \gamma)T_0; \\ 0, & (k + \gamma)T_0 \leq t < (k + 1)T_0, \end{cases} \quad (1)$$

причем скважность каждого управляющего импульса определяется соотношением

$$\gamma[kT_0] = \begin{cases} 1, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} \geq 1; \\ \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|}, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} < 1, \end{cases} \quad (2)$$

где θ – варьируемый параметр, подлежащий выбору; $U_3[kT_0]$ – сигнал на входе РН в момент времени $t = kT_0$; $\sigma[kT_0]$ – сигнал ошибки ТЗУ в момент времени $t = kT_0$:

$$\sigma[kT_0] = U_3[kT_0] - U_\Gamma[kT_0], \quad (3)$$

где $U_\Gamma[kT_0]$ – выходной сигнал ТГ.

Целью настоящей статьи является выбор значений варьируемых параметров системы наведения ТЗУ – передаточного отношения i_p редуктора Р, периода следования управляющих импульсов T_0 и величины θ , определяющей величину скважности управляющего импульса.

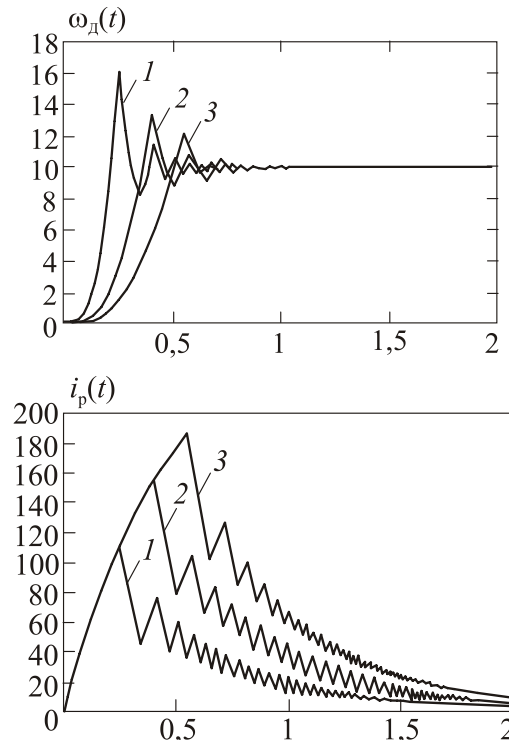
Основная часть. Используя результаты работы [1], математическую модель возмущенного движения объекта наведения ТЗУ представим в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_d(t)}{dt} &= \left[\frac{c_M k_M}{J_\Sigma i_p^2} i_{\text{я}}^2 - \frac{M_f(t)}{J_\Sigma i_p^2} \right] \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t)]; \\ \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} &= \frac{r_{\text{я}}}{l_{\text{я}}} i_{\text{я}}(t) - \frac{c_e k_M}{l_{\text{я}}} i_{\text{я}}(t) \times \\ &\quad \times \omega_d(t) \operatorname{sign}[U_3(t) - U_\Gamma(t) + U_y(t)]; \\ \frac{dU_\Gamma(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_{\text{ТГ}}} U_\Gamma(t) + \frac{k_{\text{ТГ}}}{T_{\text{ТГ}}} \omega_d(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_d(t)$ – угловая скорость вращения якоря ИЭД; $i_{\text{я}}(t)$ – ток цепи якоря ИЭД; $M_f(t)$ – момент внешних возмущений, действующих на якорь электродвигателя; J_Σ – момент инерции командирской башенки с ТЗУ, боекомплект и сидением командира танка с учетом массы командира относительно оси вращения башенки; i_p – передаточное отношение Р; c_M , c_e , k_M – постоянные конструктивные коэффициенты ИЭД; $r_{\text{я}}$ – активное сопротивление цепи якоря; $l_{\text{я}}$ – индуктивность цепи якоря; $k_{\text{ТГ}}$, $T_{\text{ТГ}}$ – коэффициент усиления и постоянная времени тахогенератора цепи обратной связи.

Уравнения (4) совместно с соотношениями (1)–(3) представляют собой математическую модель возмущенного движения замкнутой системы наведения ТЗУ. Значения параметров ТЗУ положим равными: $J_\Sigma = 0,51 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $c_M k_M = 0,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-2}$; $r_{\text{я}} = 0,42 \text{ Ом}$; $l_{\text{я}} = 0,001 \text{ Гн}$; $c_e k_M = 0,0096 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{-1}$; $U_0 = 27 \text{ В}$; $T_{\text{ТГ}} = 0,05 \text{ с}$; $k_{\text{ТГ}} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

В связи с тем, что момент, развиваемый ИЭД, намного превышает момент сопротивления $M_f(t)$, положим в математической модели (1)–(4) $M_f(t) = 0$. Рассмотрим зависимость характеристик системы наведения ТЗУ от величины передаточного отношения редуктора i_p и положим в математической модели $U_3(t) = U_{30}(t) = 1 \text{ В}$. Переходные процессы в системе наведения ТЗУ при нулевых начальных условиях уравнений (4) приведены на рис. 2.

Рис. 2 – Переходные процессы в замкнутой системе: 1 – $i_p = 0,1$; 2 – $i_p = 0,2$; 3 – $i_p = 0,3$

Анализ процессов, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы: **1)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к повышению точности стабилизации заданной скорости вращения якоря исполнительного двигателя; **2)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к уменьшению быстродействия системы регулирования; **3)** возрастание передаточного отношения редуктора приводит к возрастанию энергетических затрат на управление.

Из сказанного выше следует, что выбор передаточного отношения редуктора, связывающего исполнительный электродвигатель с погонном командирской башенки должен осуществляться из условия компромисса между тремя показателями, характеризующими эффективность ТЗУ – точностью, быстродействием и энергетическими затратами [3].

В работе [2] показано, что интегральный квадратичный функционал

$$I_1 = \int_0^T \sigma^2(t) dt \quad (5)$$

может служить количественной мерой точности и быстродействия наведения, а функционал

$$I_2 = \int_0^T i_{\text{я}}^2(t) dt \quad (6)$$

может служить количественной мерой энергетических затрат на наведение.

Между сформулированными требованиями существуют элементы противоречия, поэтому невозможно обеспечить одновременное достижение минимумов функционалов (5) и (6).

Введем в рассмотрение аддитивный функционал

$$I = \beta_1^2 I_1 + \beta_2^2 I_2 = \int_0^T [\beta_1^2 \cdot \sigma^2(t) + \beta_2^2 \cdot i_{\text{я}}^2(t)] dt \quad (7)$$

весовые коэффициенты которого β_1 и β_2 подлежат выбору. Требуется выбрать значение постоянного коэффициента θ , при котором аддитивный функционал (7) достигает минимума.

Воспользовавшись результатами работы [4], для весовых коэффициентов β_1 и β_2 функционала (7) получаем следующие значения $\beta_1 = 0,83$; $\beta_2 = 0,17$. На рис. 3 приведена зависимость значений аддитивного функционала (7), вычисленных на решениях математической модели (1)-(4) при различных значениях постоянной величины θ . Анализ рис. 3 приводит к выводу, что минимальное значение аддитивного функционала (7) достигается при выборе θ в интервале $0,01 \leq \theta \leq 0,1$.

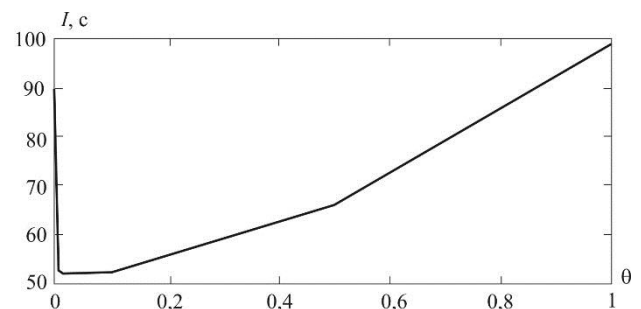


Рис. 3 – Зависимость функционала (7) от величины θ .

На рис.4 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях величины θ и при подаче на вход системы тестового задающего сигнала в виде:

$$U_3(t) = \begin{cases} 10t & \text{при } 0 \leq t \leq 1\text{с;} \\ 10 & \text{при } 1\text{с} \leq t \leq 3\text{с;} \\ 10 - 10(t - 3) & \text{при } 3\text{с} \leq t \leq 5\text{с;} \\ -10 + 10(t - 5) & \text{при } 5\text{с} \leq t \leq 6\text{с.} \end{cases}$$

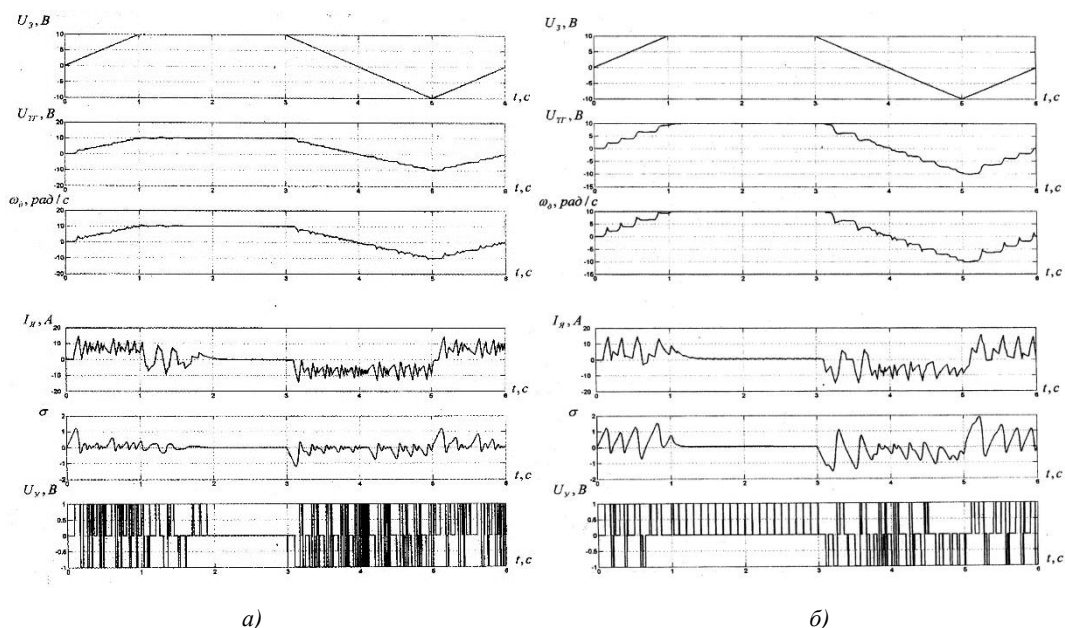


Рис. 4 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а) $\theta = 0,05$; $T_0 = 0,01\text{с}$; б) $\theta = 0,3$; $T_0 = 0,01\text{с}$

Сравнение процессов на рис. 4, приводит к выводу, что высокая точность наведения обеспечивается при $\theta = 0,04 \in [0,01 \div 0,1]$. Вне интервала $[0,01 \div 0,1]$ точность наведения снижается.

На рис. 5 приведены переходные процессы в замкнутой системе наведения ТЗУ при различных значениях периода следования управляющих импульсов T_0 .

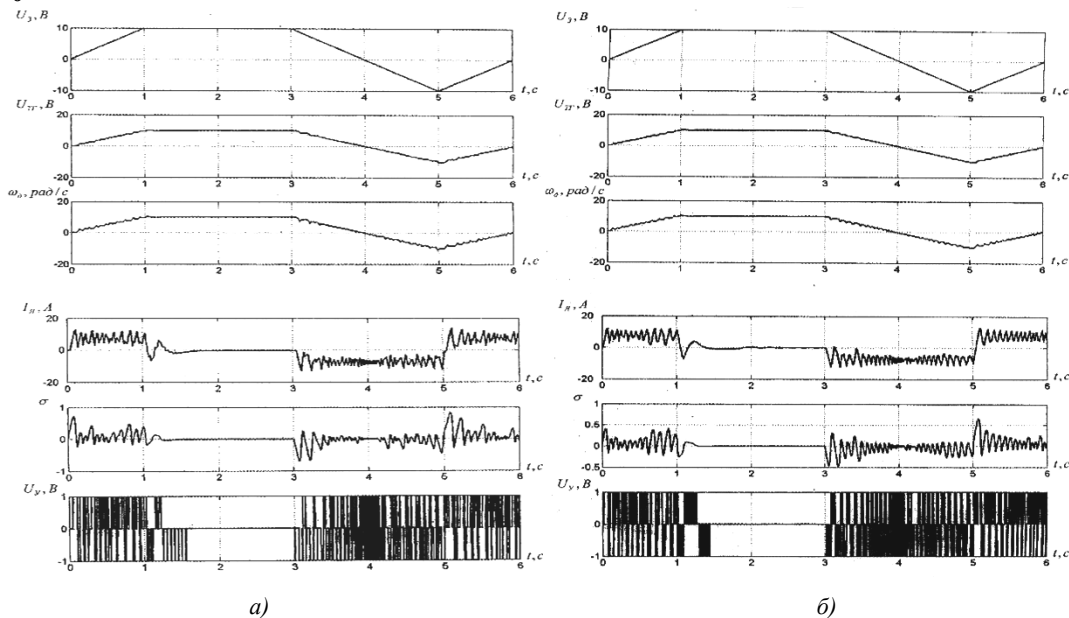


Рис. 5 – Переходные процессы наведения ТЗУ: а) $\theta = 0,03$; $T_0 = 0,02$ с; б) $\theta = 0,03$; $T_0 = 0,05$ с

Выводы. 1. Передаточное отношение редуктора, связывающего якорь исполнительного электродвигателя с погоном командирской башенки, следует выбирать на основе компромисса между точностью наведения ТЗУ, быстродействием и энергетическими затратами на наведение. 2. Скажность управляющих импульсов, определяемая величиной θ , обеспечивает высокие динамические свойства замкнутой системы наведения ТЗУ при выборе величины θ в интервале $[0,01 \div 0,1]$. 3. Период следования управляющих импульсов T_0 , обеспечивающий высокую точность наведения и низкие энергетические затраты на наведение, не должен превышать величины $T_0 = 0,01$ с.

Список литературы: 1. Александров Е. Е. Математическое моделирование динамических процессов в электроприводе импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ». – № 43. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – С. 61–63. 2. Александров Е. Е. Сравнительный анализ электронных систем импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 215–219. 3. Александров Е. Е. Параметрический синтез электромеханической

Сравнительный анализ этих рисунков позволяет сделать вывод о том, что возрастание величины T_0 приводит к снижению точности системы наведения и возрастанию энергетических затрат на наведение ТЗУ. Для обеспечения же высокой точности и низких энергетических затрат на наведение, период следования управляющих импульсов не должен превышать 0,01 с.

системы наведения танкового зенитного пулемета / Е. Е. Александров, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник НТУ «ХПІ» – № 45. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2005. – С. 110–112. 4. Александров Е. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2004. – № 2 (1). – С. 23–26.

Bibliography (transliterated):

1. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektroprivoде impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 43. 2004. 61–63. Print.
2. Aleksandrov, Ye. Ye., T. Ye. Aleksandrova, I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Sravnitelnyy analiz elektronnykh sistem impulsnogo regulirovaniya tankovoy zenitnoy ustanovki." *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. No. 2. 2004. 215–219. Print.
3. Aleksandrov, Ye. Ye., I. V. Kostyanik and S. A. Sladkih. "Parametricheskyy sintez electromekhanicheskoy sistemy navedeniya tankovogo zenitnogo pulemeta." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 45. 2005. 110–112. Print.
4. Aleksandrov, Ye. Ye. and T. Ye. Aleksandrova. "Vybory optimiziruемого funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza sistem stabilizatsii." *Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzheniya*. No. 2(1). 2004. 23–26. Print.

Надійшла (received) 05.02.2015

Александрова Татьяна Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (097) 079-50-00; e-mail: alexandrova.t@mail.ru.

Aleksandrova Tetyana Yevgenivna – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; tel.: (097) 079-50-00; e-mail: alexandrova.t@mail.ru.