

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 629.423.32:621.3.066.6

O. Y. BALIICHUK^{1*}, L. V. DUBYNETS², O. L. MARENYCH³, D. V. USTYMENKO⁴

^{1*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

²Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

³Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

⁴Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

INFLUENCE OF CONTACTOR CONTACT PRESSURE IN POWER CIRCUITS OF ELECTRIC STOCK ON THEIR PLASTIC DEFORMATION AND FUSING

Purpose. The work is aimed at conducting the study to obtain the results that will quantify the influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on the highest current value I_d , that does not cause plastic deformation of contacts; and on the current value I_{fs} – incipient fusion of contacts taking into account the operation conditions. Therefore, such a study targeted to establish the contact fusing causes is relevant. **Methodology.** The paper proposes an engineering method for determining the currents I_d and I_{fs} , taking into account the value of contact pressure, electrodynamic forces of contact repulsion $F_{e.d.r}$, as well as the pressure influence on the values of such forces. **Findings.** Taking the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) and 7SP1 (locomotive ChS4) as an example, the authors conducted the calculations and found that the peak pressure force increases the currents I_d and I_{fs} for these contactors by 11.8%; 15.5%; 11.8%; and 15.4% respectively (compared with the specified currents at the minimum pressure force). Influenced by $F_{e.d.r}$ the pressure force of contacts for 1SVAD8 contactor decreased by 13.8...31.8%, and for 7SP1 contactor the value $F_{e.d.r}$ may be greater than the pressure force. This can lead to spontaneous shutdown of the closed contactor that is not provided by the control circuit. Ensuring during operation the maximum allowable pressure force of the contacts F_c slightly affects the value $F_{e.d.r}$, compared with the case when F_c has the minimum permissible value (in event of a fault in the heating circuit $F_{e.d.r}$ for contactors 1SVAD8 and 7SP1 is reduced by only 2.45% and 2.59% respectively). **Originality.** The authors for the first time presented a quantitative assessment of influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing using the proposed engineering method. **Practical value.** The results obtained during the research allow solving the problem for developing measures aimed

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

to improve the reliability of the heating circuits of electric locomotives ChS8 and ChS4. The proposed method of determining I_d and I_{fs} can be used to quantify the influence of pressure of the main electric contacts mounted in power circuits of electric stock of all series, if during the operation there are cases of plastic deformation, fusing, welding of such contacts, in order to improve the reliability of power circuits.

Keywords: contact pressure; plastic deformation current, fusing; pressure force; repulsion; shock current; contact resistance

Introduction

Practice shows that there are cases in operation when power contacts of contactors in power circuits of electric stock are fused and sometimes welded. For example, the above effects were recorded during the operation of the electric locomotives ChS8 when the contacts of 1SVAD8 type contactor in the heating circuit of carriages were fused before the short circuit (SC) response time in the given circuit. The time of SC inception until the short-circuit response is 0.08 sec [1, 2].

Purpose

The work is aimed at conducting the study to obtain the results that will quantify the influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on the highest current value I_d , that does not cause plastic deformation of contacts; and on the current value I_{fs} – incipient fusion of contacts taking into account the operation conditions. Therefore, the study targeted to establish the contact fusing causes is relevant.

Methodology

We know that contact performance is determined by thermal processes in them [4, 5, 7, 10–12, 17–22]. Herewith the crucial is relationship between the energy losses in the contact connection A_l and the heat dispersion energy A_{hd} , which is output into the environment during the same time. The currents that are larger than the nominal ones significantly hinder the work of contacts. This gives rise to phenomena that can lead to dangerous consequences. The increasing current, for example, in SC mode in the heating coil under consideration, $(dI/dt) > 0$ causes $\Delta A = A_l - A_{hd}$, which can lead to overheating of contacts. A certain value of unbalanced energy ΔA can initiate plastic deformation of the contact surfaces and even fusing of these surfaces.

The main indicator of the quality of contact connection is voltage drop ΔU_c on it

$$\Delta U_c = I r_c, \quad (1)$$

where I – current through contacts, r_c – contact resistance.

The current rapid changes, peculiar to SC mode, lead to increase of the electrodynamic forces that reduce contact pressure, while this reduction increases the contact resistance r_c . Higher r_c further increases ΔU_c , caused by the rise in current.

The ratio between the currents I_d (the highest current which does not cause plastic deformation of contacts), I_{fs} (incipient fusion current) and the currents at certain modes in the heating circuit of the electric locomotives ChS8, ChS4 are specified in [1, 2]. This study raises the problem to study quantitatively the dependence of contact resistance r_c of the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) [13] and 7SP1 (locomotive ChS4) [15] on the contact pressure force at different operation modes of heating circuits [9].

Let us consider first the influence of the value of the contact pressure force F_c , caused by the springs, of 1SVAD8-type contactor on the current value I_d in nominal mode. The contact pressure force F_c for this contactor may be in the range of 80 N to 100 N [13]. Transition resistance at nominal mode [14, 16] is as follows:

$$r_{c \text{ nom}} = \frac{\rho_t}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{cr}}{F_c \cdot c}}, \quad (2)$$

where ρ_t – specific electrical resistance of contact materials at nominal mode, Ohm · cm;

σ_{cr} – specific crease-resistance of contact materials;

c – the number of contact points;

F_c – contact pressure force, N.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Specific electric resistance ρ_t of contact materials at nominal mode (when permissible excess temperature of contacts at ambient temperature of 40 °C by DSTU 2773-94 does not exceed 80 °C):

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \chi_{sr} T), \quad (3)$$

where ρ_0 – specific resistance at 0 °C, Ohm·cm;

χ_{sr} – temperature coefficient of specific resistance, $1/\text{degree} \cdot 10^3$;

$$T = 40 \text{ °C} + 80 \text{ °C} = 120 \text{ °C}.$$

Material of the contacts is silver (silver lining).

$$\rho_{0s} = 1.5 \text{ mkOhm} \cdot \text{cm} = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm};$$

$$\chi_{rs} = 4 \frac{1}{\text{degree} \cdot 10^3}; \quad c = 3 \text{ (for surface contacts);}$$

specific crease-resistance for silver contacts $\sigma_{cr.s} = 303 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$ [13, 15, 16]. Then:

$$\rho_{t.s} = 1.5 \cdot 10^{-6} (1 + 0.48) = 2.22 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm},$$

According to (2) when $F_c = 80 \text{ N}$:

$$r_{c \text{ nom.s}} = \frac{2.22 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{80 \cdot 3}} = 22.1 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

According to [6]

$$I_d = \frac{0.56 \cdot \Delta U_s}{r_{c \text{ nom}}}, \quad (4)$$

where ΔU_s – voltage drop in the contact that corresponds to material softening. For silver $\Delta U_{sc} = 0.09 \text{ V}$ [14]. In figures:

$$I_{ds} = \frac{0.56 \cdot 0.09}{22.1 \cdot 10^{-6}} = 2280 \text{ A}$$

When $F_c = 100 \text{ N}$:

$$r_{c \text{ nom.s}} = \frac{2.22 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{100 \cdot 3}} = 19.76 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{ds} = \frac{0.56 \cdot 0.09}{19.76 \cdot 10^{-6}} = 2550 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force $F_c = 100 \text{ N}$ during operation of the contactor 1SVAD8 increases the value of current I_{ds} , that does not cause plastic deformation of contacts by $\frac{2550 - 2280}{2280} \cdot 100 \% = 11.8 \%$ compared to the

current value I_{dc} at the minimum allowable value of the pressure force $F_c = 80 \text{ N}$.

For contactor 7SP1 [13, 15, 16]:

– contact pressure force F_c may be in the range of 90 N to 120 N;

– contact material is cadmium copper;

– $c = 2$ (for linear contacts);

$$\chi_{rcp} = 2.6 \frac{1}{\text{degree} \cdot 10^3};$$

$$\sigma_{cr.cp} = 505 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2;$$

$$\rho_{0cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

Then

$$\rho_{t.cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{2.6 \cdot 120}{1000} \right) = 2.82 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$$

When $F_c = 90 \text{ N}$:

$$r_{c \text{ nom.cp}} = \frac{2.82 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{90 \cdot 2}} = 41.85 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$\Delta U_{scp} = 0.12 \text{ V [6].}$$

$$I_{dcp} = \frac{0.56 \cdot 0.12}{41.85 \cdot 10^{-6}} = 1605 \text{ A}$$

When $F_c = 120 \text{ N}$:

$$r_{c \text{ nom.cp}} = \frac{2.82 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{120 \cdot 2}} = 36.24 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{dcp} = \frac{0.56 \cdot 0.12}{36.24 \cdot 10^{-6}} = 1854 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force $F_c = 120 \text{ N}$ during operation of the contactor 7SP1 in nominal mode increases the value of current I_{dcp} , that does not cause plastic deformation of

contacts by $\frac{1854 - 1605}{1605} \cdot 100 \% = 15.5 \%$ com-

pared to the current value I_{dcp} at the minimum allowable value of the pressure force $F_c = 90 \text{ N}$.

Further, we consider the effect of the force F_c on the current value I_{fs} . For contactor 1SVAD8:

– fusion temperature for silver is $T_{fs.s} = 960 \text{ °C}$ [16];

$$\Delta U_{fs.s} = 0.37 \text{ V [6];}$$

At the beginning of fusion according to (3):

$$\rho_{fst} = 1.5 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{4 \cdot 960}{1000} \right) = 7.26 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

When $F_c = 80$ N according to (2):

$$r_{c \text{ nom. fs. s}} = \frac{7.26 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{80 \cdot 3}} = 72.27 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.s} = \frac{0.58 \cdot \Delta U_{fs.s}}{r_{c \text{ nom. fs. s}}} [6]$$

In figures

$$I_{fs} = \frac{0.58 \cdot 0.37}{72.27 \cdot 10^{-6}} = 2969 \text{ A}$$

When $F_c = 100$ N:

$$r_{c \text{ nom. fs. s}} = \frac{7.26 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 303 \cdot 10^2}{100 \cdot 3}} = 64.64 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.s} = \frac{0.58 \cdot 0.37}{64.64 \cdot 10^{-6}} = 3320 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force $F_c = 100$ N during operation of the contactor 1SVAD8 increases the fusion current by $\frac{3320 - 2969}{2969} \cdot 100 \% = 11.8 \%$ compared to the fusion current value at the minimum allowable value of the pressure force $F_c = 80$ N.

For contactor 7SP1:

– fusion temperature for copper

$$T_{fs.cp} = 1083 \text{ } ^\circ\text{C} [16];$$

– $\Delta U_{fs.cp} = 0.43$ V [6];

At the beginning of fusion according to (3):

$$\rho_{fst.cp} = 2.15 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{2.6 \cdot 1083}{1000} \right) = 8.19 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

When $F_c = 90$ N:

$$r_{c \text{ nom. fs. cp}} = \frac{8.19 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{90 \cdot 2}} = 121.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

According to (5):

$$I_{fs.cp} = \frac{0.58 \cdot 0.43}{121.5 \cdot 10^{-6}} = 2053 \text{ A}$$

When $F_c = 120$ N:

$$r_{c \text{ nom. fs. cp}} = \frac{8.19 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot 505 \cdot 10^2}{120 \cdot 2}} = 105.2 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}$$

$$I_{fs.cp} = \frac{0.58 \cdot 0.43}{105.2 \cdot 10^{-6}} = 2370 \text{ A}$$

Thus, ensuring of the maximum pressure force $F_c = 120$ N during operation of the contactor 7SP1 increases the fusion current by

$$\frac{2370 - 2053}{2053} \cdot 100 \% = 15.4 \% \text{ compared to the}$$

fusion current value at the minimum allowable pressure force $F_c = 90$ N.

Further we define the electrodynamic repulsion forces $F_{e.d.r}$ between the contacts, under which the contact pressure is reduced, resulting in increased contact resistance r_c . It is necessary to assess the value of the forces $F_{e.d.r}$ compared to the forces F_c . May the effect of $F_{e.d.r}$ lead to contact breaking?

These forces are equal to [12]:

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \left(\frac{D}{2r_0} \right), \quad (5)$$

where D and r_0 are the sizes indicated in Fig. 1;

I – current in heating circle at appropriate mode.

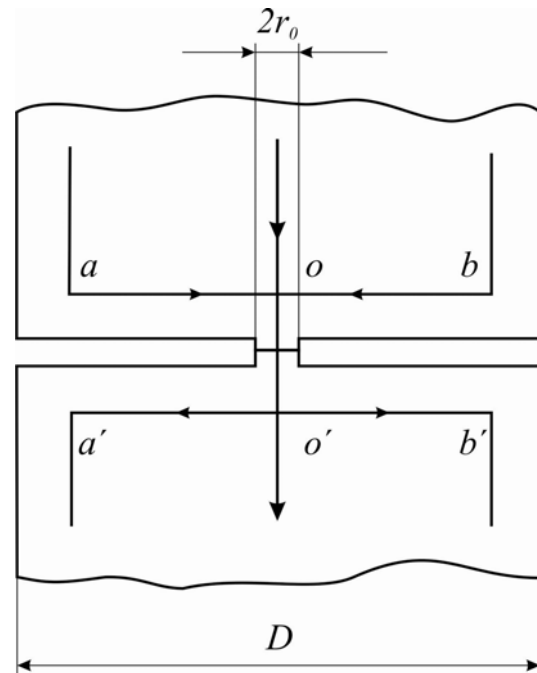


Fig. 1. Scheme of current flow lines in the contact

Fig. 1 shows a conventional scheme of the current lines approach to the contact point. At the sections $ao - a'o'$ and $ob - ob'$ the currents have opposite directions and there are the electrodynamic repulsion forces between them. In case of alternating current the electrodynamic repulsion force pulses with double frequency compared to the current frequency, varying from zero to the maximum

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

value without changing the sign (as in the expression (5) the current I is squared). Radius r_0 of the creasing area (cm) is determined by the pressure force in the contacts and resistance $\sigma_{cr.s}$ [12]:

$$r_0 = \sqrt{F_c / \pi \sigma_{cr.s}}. \quad (6)$$

The most (shock) values of $F_{e.d.r}$ will be in SC mode when there is no load on the heating coil. [3] For electric locomotive ChS8 (contactor 1SVAD8) the shock currents i_{sh} during short circuit in the heating circle equal to [1, 2];

$$i'_{sh} = 3981.9 \text{ A when } U_1 = 19 \text{ kV}$$

$$i''_{sh} = 5239.8 \text{ A when } U_1 = 25 \text{ kV}$$

$$i'''_{sh} = 6078.7 \text{ A when } U_1 = 29 \text{ kV}.$$

U_1 is voltage in the contact network: the minimum allowable in operation (19 kV), nominal (25 kV), the maximum allowable (29 kV). SC took place at the time point, when, $\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}$, where α_0 is the phase angle U_1 for the first time point of SC. φ_c – is the angle between the vectors U_c та and I_c in SC mode.

U_c and I_c are voltage and current in the traction transformer SC study during short-circuiting of heating coil. We consider the most difficult option when SC for $\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}$ is at the electric circuit section of from the heating coil clamp to the first electric furnace in the car. Such SC can result from the breakdown of high voltage cable lines, inter-car connection isolation (which is most likely), erroneous actions of service personnel, etc. [8].

For calculations we take the average of the contact pressure force $F_c = 90 \text{ N}$, $\sigma_{cr.s} = 303 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$, $D = 3 \text{ cm}$ [2].

According to (6):

$$r_0 = \sqrt{90 / \pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.03 \text{ cm}.$$

According to (5):

$$F'''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 6078.7^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.03} \right) = 28.6 \text{ N}$$

when $U_1 = 29 \text{ kV}$.

$$F''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.03} \right) = 21.5 \text{ N}$$

when $U_1 = 25 \text{ kV}$.

$$F'_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 3981.9^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.03} \right) = 12.4 \text{ N}$$

when $U_1 = 19 \text{ kV}$.

Pressure force $F_c = 90 \text{ N}$ under the influence of the forces $F_{e.d.r}$ will decrease in the range from $\frac{12.4}{90} \cdot 100 \% = 13.8 \%$ to $\frac{28.6}{90} \cdot 100 \% = 31.8 \%$.

Thus, under the influence of electrodynamic repulsion forces in this case the 1SVAD8 contactor contacts will not be disconnected, but the contact pressure is significantly reduced, leading to a substantial increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusing.

For electric locomotive ChS4 (contactor 7SP1) the shock currents i_{sh} in the same condition, that the short circuit is occurred at time point when

$$\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}, \text{ equal to [1, 2]}$$

$$i'_{sh} = 7076.8 \text{ A when } U_1 = 19 \text{ kV}$$

$$i''_{sh} = 9313.4 \text{ A when } U_1 = 25 \text{ kV}$$

$$i'''_{sh} = 10801.7 \text{ A when } U_1 = 29 \text{ kV}.$$

For calculations we take $F_c = 90 \text{ N}$, $\sigma_{cr.cp} = 505 \cdot 10^2 \text{ N/cm}^2$, $D = 3 \text{ cm}$ [2].

According to (6):

$$r_0 = \sqrt{90 / \pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.024 \text{ cm}.$$

According to (5):

$$F'''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 10801.7^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.024} \right) = 96.5 \text{ N}$$

when $U_1 = 29 \text{ kV}$.

$$F''_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.024} \right) = 71.73 \text{ N}$$

when $U_1 = 25 \text{ kV}$.

$$F'_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 7076.8^2 \ln \left(\frac{3}{2 \cdot 0.024} \right) = 41.3 \text{ N}$$

when $U_1 = 19 \text{ kV}$.

Thus, under the influence of electrodynamic repulsion forces ($F'_{e.d.r} = 41.3 \text{ N} < F_c = 90 \text{ N}$ and

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$F_{e.d.r}'' = 71.73 \text{ N} < F_c = 90 \text{ N}$) the 7SP1 contactor contacts will not be disconnected, but the contact pressure is significantly reduced, leading to a substantial increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusion.

However the electrodynamic repulsion force $F_{e.d.r}''' = 96.5 \text{ N} > F_c = 90 \text{ N}$ and the contactor 7SP1 can disconnect liberally, bearing SC current. Thus a powerful electric arc arises that first of all will fuse the contacts. It should be noted that the scheme does not provide the circuit breaking by the contactors 1SVAD8 and 7SP1 in current. Given that on the electric locomotives ChS8 and ChS4 the currents i_{sh}' , i_{sh}'' , i_{sh}''' are equal to several thousand amperes, it can be stated that for the time $t = 0.08 \text{ sec}$ [2] (until the main switch deenergizes the circuit of the electric locomotive) the fusion process will pass its active phase. The fused metal, spraying in all directions, can cause a fire in the chamber, where contactors 1SVAD8 and 7SP1 are mounted.

Let us consider the effect of the contactor contacts pressure on the value of the electrodynamic repulsion forces at SC in the heating circuit. For example, we consider SC at $U_1 = 25 \text{ kV}$, when

$$\alpha_0 - \varphi_c = \frac{\pi}{2}.$$

Contactor 1SVAD8: $i_{sh} = i_{sh}'' = 5239.8 \text{ A}$. When $F_c = 80 \text{ N}$ according to (6):

$$r_0 = \sqrt{80/\pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.029 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.029}\right) = 21.6 \text{ N}.$$

When $F_c = 100 \text{ N}$

$$r_0 = \sqrt{100/\pi \cdot 303 \cdot 10^2} = 0.032 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5239.8^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.032}\right) = 21.07 \text{ N}.$$

Thus ensuring of the maximum allowable pressure force $F_c = 100 \text{ N}$ during operation of the contactor 1SVAD8 reduces the electrodynamic contact repulsion force $F_{e.d.r}$ at SC in the heating circuit by $\frac{21.6 - 21.07}{21.6} \cdot 100 \% = 2.45 \%$ compared to the

value $F_{e.d.r}$ at the minimum allowable force $F_c = 80 \text{ N}$.

Contactor 7SP1: $i_{sh} = i_{sh}'' = 9313.4 \text{ A}$. When $F_c = 90 \text{ N}$ according to (6):

$$r_0 = \sqrt{90/\pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.024 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.024}\right) = 71.3 \text{ N}$$

When $F_c = 120 \text{ N}$

$$r_0 = \sqrt{120/\pi \cdot 505 \cdot 10^2} = 0.027 \text{ cm}.$$

$$F_{e.d.r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 9313.4^2 \ln\left(\frac{3}{2 \cdot 0.027}\right) = 69.5 \text{ N}.$$

Thus ensuring of the maximum allowable pressure force $F_c = 120 \text{ N}$ during operation of the contactor 7SP1 reduces the electrodynamic contact repulsion force $F_{e.d.r}$ at SC in the heating circuit by $\frac{71.3 - 69.5}{69.5} \cdot 100 \% = 2.59 \%$ compared to the value $F_{e.d.r}$ at the minimum allowable force $F_c = 90 \text{ N}$. That is to say, both for contactor 1SVAD8 and for contactor 7SP1 ensuring of the maximum allowable pressure force F_c during operation does not significantly affect the value $F_{e.d.r}$ compared to the case when F_c has the minimum allowable value.

Findings

Taking the contactors 1SVAD8 (locomotive ChS8) and 7SP1 (locomotive ChS4) as an example, the authors conducted the calculations and found that the peak pressure force increases the currents I_d and I_{fs} for these contactors by 11.8 %; 15.5 %; 11.8 %; and 15.4 % respectively (compared with the specified currents at the minimum pressure force). Influenced by $F_{e.d.r}$ the pressure force of contacts for 1SVAD8 contactor decreased by 13.8–31.8 %, and for 7SP1 contactor the value $F_{e.d.r}$ may be greater than the pressure force; this can lead to spontaneous shutdown of the closed contactor that is not provided by the control circuit. Ensuring during operation the maximum allowable pressure force of the contacts F_c slightly affects the value $F_{e.d.r}$, compared with the case

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

when F_c has the minimum permissible value (in event of a fault in the heating circuit $F_{e.d.r}$ for contactors 1SVAD8 and 7SP1 is reduced by only 2.45 % and 2.59 % respectively).

Originality and practical value

The paper for the first time presented a quantitative assessment of influence of contactor contact pressure in power circuits of electric stock on their plastic deformation and fusing using the proposed engineering method.

The results obtained during the research allow solving the problem for developing measures aimed to improve the reliability of the heating circuits of electric locomotives ChS8 and ChS4. The proposed method of determining I_d and I_{fs} can be used to quantify the influence of pressure of the main electric contacts mounted in power circuits of electric stock of all series, if during the operation there are cases of plastic deformation, fusing, welding of such contacts, in order to improve the reliability of power circuits.

Conclusions

1. The proposed method of determining the influence of the contact pressure of contactors in the power circuits of electric stock on their plastic de-

formation and fusing can be used for all series of electric locomotives and trains.

2. Ensuring the maximum allowable pressure force during operation of the contactors 1SVAD8 and 7SP1 increases the value of current that does not cause plastic deformation of contacts, respectively by 11.8 % and 15.5 %, compared with the value of this current at the minimum allowable value of the pressure force. Herewith the fusion current of the contacts increases respectively by 11.8 % and 15.4 %.

3. The electrodynamic contact repulsion forces during SC in the heating circuits of the electric locomotives ChS8 (contactor 1SVAD8) at the contact network voltage of 19 kV, 25 kV, 29 kV are respectively equal to 12.4 N, 21.5 N, 28.6 N, which leads to a significant increase in contact resistance, instant increase in contact energy losses and therefore to increased contact fusing. These forces in the heating circuit of the electric locomotives ChS4 (contactor 7SP1) are equal to 41.4 N (at 19 kV), 71.73 N (at 25 kV) and at 29 kV the repulsion force is 96.5 N, that is more than the minimum allowable pressure force of 90 N. Therefore, the contactor 7SP1 can disconnect liberally, bearing SC current, and that is not envisaged by the scheme.

4. The results of the research can be used in the development of measures to improve the reliability of power circuits of the electric stock.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Дослідження процесу короткого замикання у колі опалення електровоза ЧС8 / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, О. Л. Маренич, Є. Р. Сушкевич // Гірни. електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2011. – № 86. – С. 159–167.
2. Дослідження та розробка заходів щодо підвищення надійності захисту кіл опалення пасажирських електровозів змінного струму : звіт про НДР / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна ; кер. Дубинець Л. В. ; вик. : Устименко Д. В., Маренич О. О. – Дніпропетровськ, 2010. – 44 с. – Бібліогр.: с. 42. – № ДР 0110U006290.
3. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини : навч. посібник для вузів / Л. В. Дубинець, О. І. Момот, О. Л. Маренич. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
4. Дугостойкий электроконтактный материал на основе меди для электроаппаратуры тягового подвижного состава / Л. А. Тимофеева, В. С. Морозов // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 6. – С. 37–41. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.59967.
5. Загирняк, М. В. Электрические аппараты : учеб. пособие / М. В. Загирняк, Н. И. Кузнецов. – Кременчуг : Кременчуг. гос. политехн. ун-т, 2005. – 319 с.
6. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические аппараты : учеб. для вузов / Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1991. – 247 с.
7. Клименко, Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Точка, 2012. – 340 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Лапшин, Е. В. Электрические аппараты и цепи пассажирских вагонов / Е. В. Лапшин // Вагонный парк. – 2013. – № 6. – С. 14–21.
9. Маренич, О. О. Вплив відхилень параметрів привода електромагнітних контакторів електрорухомого складу від їх номінальних значень на надійність роботи контакторів / О. О. Маренич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 26. – С. 60–62.
10. Муравьев, Д. В. Анализ потерь мощности в электромагнитных контакторах типа МК электровозов постоянного и переменного тока / Д. В. Муравьев // Транспорт Урала. – 2016. – № 1 (48). – С. 46–52. doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52.
11. Муха, А. М. Підвищення надійності гібридних тягових електричних апаратів / А. М. Муха // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тез. докл. 73 Междунар. науч.-практ. конф. (23.05–24.05.2013) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна ; Науч.-произв. предприятие «Укртранскад». – Днепропетровск, 2013. – С. 129–130.
12. Нагрев силовых электрических контактов ударными токами короткого замыкания / А. М. Чалый, В. А. Дмитриев, М. А. Павлейно, О. М. Павлейно // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 81–88.
13. Описание приборов «А» ЧС8. Комплект эксплуатационной документации к электровозу ЧС-8. – Киев, 2010. – 156 с.
14. Основы теории электрических аппаратов : учебник / под ред. И. С. Таева. – Москва : Высш. шк., 1987. – 352 с.
15. Пассажирские электровозы ЧС4 и ЧС4т / В. А. Каптелкин, Ю. В. Колесин, И. П. Ильин [и др.]. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Транспорт, 1975. – 384 с.
16. Таев, И. С. Электрические аппараты автоматики и управления : учеб. пособие для ВТУЗов / И. С. Таев. – Москва : Высш. шк., 1975. – 224 с.
17. Электрические и электронные аппараты : учебник : в 2 т. / под ред. А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанова. – Москва : Изд. центр «Академия», 2010. – Т. 1 : Электромеханические аппараты. – 352 с.
18. A Novel Breaking Strategy for Electrical Endurance Extension of Electromagnetic Alternating Current Contactors / Z. Wu, G. Wu, C. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 5. – P. 749–756. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2542101.
19. Load influence on the response of AC-Contactors under power quality disturbances / A. Honrubia-Escribano, E. Gómez-Lázaro, A. Molina-Garcia, S. Martín-Martínez // Intern. J. of Electrical Power & Energy Systems. – 2014. – Vol. 63. – P. 846–854. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.056.
20. Pressman, A. I. Switching Power Supply Design / A. I. Pressman. – New York : McGraw-Hill, Inc., 1999. – 677 p.
21. Tunaboylu, B. Electrical Characterization of Test Sockets With Novel Contactors / B. Tunaboylu // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2014. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 580–582. doi: 10.1109/tdmr.2012.2209888.
22. Sterl, N. Power relays. EH-Schrack Components AG / N. Sterl. – Vienna, Austria : Tyco Electronics Austria GmbH G, 1997. – 137 p.

О. Ю. БАЛІЙЧУК^{1*}, Л. В. ДУБИНЕЦЬ², О. Л. МАРЕНИЧ³, Д. В. УСТИМЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

²Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

³Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

⁴Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

ВПЛИВ НАТИСНЕННЯ КОНТАКТІВ КОНТАКТОРІВ У СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ЇХ ПЛАСТИЧНУ ДЕФОРМАЦІЮ ТА ПЛАВЛЕННЯ

Мета. У роботі необхідно провести дослідження для отримання результатів, які дозволять кількісно оцінити вплив натиснення контактів контакторів у силових колах електрорухомого складу на значення найбільшого струму I_d , що не викликає пластичної деформації контактів; та на значення струму $I_{пл}$ – початку плавлення контактів із урахуванням умов експлуатації. Тому такі дослідження з метою встановлення причин розплавлення контактів є актуальними. **Методика.** Запропоновано інженерний метод визначення струмів I_d та $I_{пл}$ із урахуванням величини натиснення контактів, визначення електродинамічних сил відштовхування контактів $F_{с.д.в.}$, а також впливу натиснення на значення таких сил. **Результати.** На прикладі контакторів 1SVAD8 (електровоз ЧС8) та 7SP1 (електровоз ЧС4) після проведених авторами розрахунків встановлено, що забезпечення максимальної сили натиснення збільшує струми I_d та $I_{пл}$ для вказаних контакторів на 11,8 %; 15,5 %; 11,8 %; та 15,4 % відповідно (в порівнянні з вказаними струмами при мінімальній допустимій силі натиснення). Під впливом $F_{с.д.в.}$ сила натиснення контактів контактора 1SVAD8 зменшується на 13,8...31,8 %, а для контактора 7SP1 значення $F_{с.д.в.}$ може стати більше за силу натиснення. Це може призвести до самовільного відключення контактора під струмом, що не передбачено схемою керування. Забезпечення при експлуатації максимальної допустимої сили натиснення контактів F_k незначно впливає на значення $F_{с.д.в.}$, у порівнянні з випадком, коли F_k має мінімальне допустиме значення (при короткому замиканні у колі опалення $F_{с.д.в.}$ для контакторів 1SVAD8 та 7SP1 зменшується всього на 2,45 % та 2,59 % відповідно). **Наукова новизна.** Авторами вперше дана чисельна оцінка впливу натиснення контактів контакторів у силових колах електрорухомого складу на їх пластичну деформацію та плавлення з використанням запропонованого інженерного методу. **Практична значимість.** Отримані в ході досліджень результати дозволяють вирішувати задачу по розробці заходів щодо підвищення надійності роботи кіл опалення електровозів ЧС8 та ЧС4. Запропонований метод із визначення I_d та $I_{пл}$ може бути використаний для кількісної оцінки впливу натиснення головних контактів електроапаратів, що стоять у силових колах електрорухомого складу всіх серій, якщо при експлуатації мають місце випадки пластичної деформації, плавлення, зварювання контактів цих апаратів із метою підвищення надійності роботи силових кіл.

Ключові слова: натиснення контактів; струм пластичної деформації; плавлення; сила натиснення; відштовхування; ударний струм; опір контактів

А. Ю. БАЛИЙЧУК^{1*}, Л. В. ДУБИНЕЦЬ², О. Л. МАРЕНИЧ³, Д. В. УСТИМЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта baliichukaleksei@mail.ru, ORCID 0000-0003-0119-1446

²Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-0319-4544

³Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mona.shelley@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

⁴Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

ВЛИЯНИЕ НАЖАТИЯ КОНТАКТОВ КОНТАКТОРОВ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ИХ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ И ПЛАВЛЕНИЕ

Цель. В работе необходимо провести исследование для получения результатов, которые позволят количественно оценить влияние нажатия контактов контакторов в силовых цепях электроподвижного состава на значение наибольшего тока I_d , который не вызывает пластичной деформации контактов; и на значение тока $I_{пл}$ – начала плавления контактов с учетом условий эксплуатации.

Методика. Предложен инженерный метод определения токов I_d и $I_{пл}$ (с учетом значения давления контактов), электродинамических сил отталкивания контактов $F_{э.д.о}$, а также влияния давления на значения таких сил. **Результаты.** На примере контакторов 1SVAD8 (электровоз ЧС8) и 7SP1 (электровоз ЧС4) после проведенных авторами расчетов установлено, что обеспечение максимальной силы давления увеличивает токи I_d и $I_{пл}$ для указанных контакторов на 11,8 %; 15,5 %; 11,8 %; 15,4 % соответственно (в сравнении с указанными токами при минимально допустимой силе давления). Под влиянием $F_{э.д.о}$ сила давления контактов контактора 1SVAD8 уменьшается на 13,8...31,8 %, а для контактора 7SP1 значение $F_{э.д.о}$ может стать больше силы давления. Это может привести к самопроизвольному отключению контактора под током, что не предусмотрено схемой управления. Обеспечение при эксплуатации максимальной допустимой силы давления контактов F_k несущественно влияет на значение $F_{э.д.о}$, в сравнении со случаем, когда F_k имеет минимальное допустимое значение (при коротком замыкании в цепи отопления $F_{э.д.о}$ для контакторов 1SVAD8 и 7SP1 уменьшается всего на 2,45 % и 2,59 % соответственно). **Научная новизна.** Авторами впервые дана количественная оценка влияния давления контактов контакторов в силовых цепях электроподвижного состава на их пластическую деформацию и плавление с использованием предложенного инженерного метода. **Практическая значимость.** Полученные при исследовании результаты позволяют решать задачу разработки мероприятий по повышению надежности работы цепей отопления электровозов ЧС8 та ЧС4. Предложенный метод по определению I_d и $I_{пл}$ может быть использован для количественной оценки влияния давления главных контактов электроаппаратов, которые стоят в силовых цепях электроподвижного состава всех серий, если при эксплуатации имеют место случаи пластической деформации, плавления, сваривания контактов этих аппаратов с целью повышения надежности работы силовых цепей.

Ключевые слова: давление контактов; ток пластической деформации; плавление; сила давления; отталкивание; ударный ток; сопротивление контактов

REFERENCES

1. Dubynets, L. V., Karzova, O. O., Marenych, O. L., & Sushkevych, Y. R. (2011). Doslidzhennia protsesu korotkoho zamykannia u koli opalennia elektrovoza ChS8. *Mining Electrical Engineering and Automation*, 86, 159-167.
2. Dubynets, L. V., Ustymenko, D. V., & Marenych, O. O. (2010). *Doslidzhennia ta rozrobka zakhodiv shchodo pidvyshchennia nadiinosti zakhystu kil opalennia pasazhyrskykh elektrovoziv zminnoho strumu*. [Manuscript]. No. DR 0110U006290. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, Ukraine.
3. Dubynets, L. V., Momot, O. I., & Marenych, O. L. (2004). *Elektrychni mashyny. Transformatory. Asynkhronni mashyny*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Press.
4. Timofeyeva, L. A., & Morozov, V. S. (2015). Arc-resistant copperbased electrocontact material for electrical equipment of traction rolling stock. *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 6, 37-41. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.59967
5. Zagirnyak, M. V., & Kuznetsov, N. I. (2005). *Elektricheskiye apparaty*. Kremenchuk: Kremenchuk State Polytechnic University Press.
6. Zakharchenko, D. D. (1991). *Tyagovyie elektricheskiye apparaty*. Moscow: Transport.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Klymenko, B. V. (2012). *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs*. Kharkiv: Tochka.
8. Lapshin, Y. V. (2013). Elektricheskiye apparaty i tsepi passazhirskikh vagonov. *Car Fleet*, 6, 14-21.
9. Marenych, O. O. (2009). The deviations effect of the parameters of the actuator of the electric rolling stock electromagnetic contactors from their nominal values on the reliability of contactors. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 26, 60-62.
10. Muravyov, D. V. (2016). Analysis of power losses in magnetic contactors of MK-type DC and AC locomotives. *Transport of the Urals*, 1(48), 46-52. doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-46-52
11. Mukha, A. M. (2013). A reliability raising of hybrid traction electric apparatus. *Abstracts of the 73 International Scientific and Practical Conference "The Problems and Prospects of Railway Transport Development"*, May 23-24, 2013, Dnipropetrovsk. 129-130.
12. Chalyi, A. M., Dmitriyev, V. A., Pavlieino, M. A., & Pavlieino, O.M. (2013). Nagrev silnotochnykh elektricheskikh kontaktov udarnymi tokami korotkogo замыкания. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 49(5), 81-88.
13. *Opisaniye priborov "A" ChS8: Komplekt ekspluatatsionnoy dokumentatsii k elektrovozu ChS-8*. (2010). Kyiv.
14. Taev, I. S. (Ed). (1987). *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov*. Moscow: Vysshaya shkola.
15. Kaptelkin, V. A., Kolesin, Y. V., Ilin, I. P., Potapov, A. S., & Mokhovikov, D. I. (1975). *Passazhirskiyelektrovozy ChS4 i ChS4t* (2nd ed.). Moscow: Transport.
16. Taev, I. S. (1975). *Elektricheskiye apparaty avtomatiki i upravleniya*. Moscow: Vysshaya shkola.
17. Godzhello, A. G., & Rozanov, Y. K. (Eds). (2010). *Elektricheskiye i elektronnyye apparaty: Elektromekhanicheskiye apparaty* (Vol. 1). Moscow: Academia.
18. Wu, Z., Wu, G., Chen, C., Fang, Y., Pan, L., & Huang, H. (2016). A Novel Breaking Strategy for Electrical Endurance Extension of Electromagnetic Alternating Current Contactors. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 6(5), 749-756. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2542101
19. Honrubia-Escribano, A., Gómez-Lázaro, E., Molina-García, A., & Martín-Martínez, S. (2014). Load influence on the response of AC-Contactors under power quality disturbances. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 846-854. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.056
20. Pressman, A. I. (1999). *Switching Power Supply Design*. New York, USA: McGraw-Hill, Inc.
21. Tunaboğlu, B. (2014). Electrical Characterization of Test Sockets With Novel Contactors. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 14(1), 580-582. doi: 10.1109/tdmr.2012.2209888
22. Sterl, N. (1997). *Power relays. EH-Schrack Components AG*. Vienna, Austria: Tyco Electronics Austria GmbH.

Prof. A. M. Mukha, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. F. P. Shkrabets, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published)

Accessed: Dec. 14, 2016

Received: March 23, 2017