

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ ПРИ КОМУТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

**В. В. КОРОБСЬКИЙ**, кандидат технічних наук, доцент  
**А. С. СІРОШТАН**, студент магістратури  
E-mail: kor.vladlen.2002@gmail.com

**Анотація.** Запропоновано формулу для визначення величини електричної енергії, яка виділяється за один цикл комутації в одному контакті, і розраховано втрати електроенергії при однократній комутації дуги електромагнітним пускачем із серійними та дослідними контактними матеріалами.

Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, параметрами електричної мережі та величиною енергетичних втрат при комутації дуги.

Об'єктами експериментального дослідження були контакт-деталі, що виготовлені із серійного (CrMo<sub>0,2</sub>+M1) та дослідного (81,3%Cu+10%Cr+2,0%TiB<sub>2</sub>+3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr) контактних матеріалів. Вони використовувалися в електромагнітних пускачах ПМЛ – 1100.

Осцилограми струму і напруги отримуються за допомогою універсального двопробеневого запам'ятовуючого осцилографа С8-14.

Зменшення часу горіння електричної дуги при комутації струму можна досягти за рахунок введення в композицію таких складових: С, Мо, МоО<sub>3</sub>, Cr. Економічна ефективність застосування пускачів ПМЛ 1100 з дослідними контактами досягається за рахунок значно меншої вартості контакт-деталей (приблизно в 22–25 разів) Для споживача забезпечується зниження втрат на 6% електричної енергії, яка виділяється при комутації струму в контактах.

**Ключові слова:** втрати електричної енергії, електричний апарат, електрична дуга, контактна система, електромагнітний пускач, екологічно-безпечний композиційний матеріал, металокерамічний контакт

**Актуальність.** Електрична енергія  $W$ , яка виділяється в комутуючих пристроях при комутації, перетворюється в теплову  $Q$ . Частина її ( $Q_1$ ) витрачається на нагрівання маси металу контакт-деталі нерухомої та рухомої до температури плавлення і частково на плавлення металу на робочій поверхні контакт-деталі; інша частина ( $Q_2$ ) – на нагрівання маси розплавленого металу до температури кипіння й на випаровування частини металу. З іншого боку, ця енергія  $W$  має дві складові: одну – прямо пропорційну часу горіння дуги  $t_0$  і яка зумовлюється активним навантаженням кола –  $WR$ , та другу – постійну –  $WL$ , яка дорівнює

енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивностях електричного кола і витрачається в комутуючих пристроях при комутації.

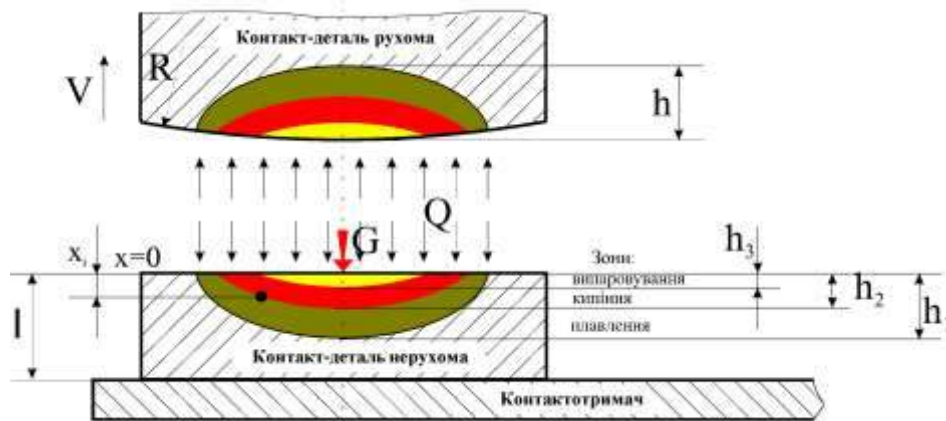
Тому, розглядаючи теплові й електромагнітні процеси для одного полюса реле або пускача, можна записати [1]:

$$W = Q = Q_1 + Q_2 = W_R + W_L. \quad (1)$$

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** За формою більшість контакт-деталей електричних апаратів виготовляються круглого перерізу з плоскою або сферичною робочою поверхнею, причому величина діаметра  $d$  значно перевищує висоту  $l$  контакт-деталі (рис. 1) [1]. Тому при однократній комутації контакт-деталей будемо вважати, що тепловіддача здійснюється з протилежного боку робочої поверхні (з боку прикріплення до контактотримача) у навколишнє середовище, а з бічних поверхонь тепловіддача відсутня і що тепло до контакт-деталі надходить імпульсами протягом часу  $t_0$ , крізь всю його робочу площу поверхнею  $S$ . Тепло надходить перпендикулярно до поверхні й теплопровідність у всіх напрямках однакова. Тривалість імпульсів тепла  $Q_1$  дорівнює часу горіння електричної дуги між електродами  $t_0$  ( $\approx$  часу однократного замикання або розмикання контакт-деталей). Кількість тепла  $Q_1$  – це тепло, необхідне для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення.

Граничні умови [3]:

-  $T(x,0)=0$ ; (перепад температур контакт-деталі та навколишнього середовища в початковий момент дорівнює нулю);



**Рис. 1. Схематичне зображення контакт-деталей пускача при однократній комутації струму**

-  $T(l, t)=0$ ; (температура точок протилежного боку деталі при  $x=l$  також дорівнює температурі середовища і вона стала величиною).

**Мета дослідження** – встановлення взаємозв'язку між теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, параметрами електричної мережі та величиною енергетичних витрат при комутації дуги.

**Матеріали і методи дослідження.** Об'єктами експериментального дослідження були контакт-деталі, виготовлені із серійного ( $\text{CrM}0,2+\text{M}1$ ) та дослідного ( $81,3\%\text{Cu}+10\%\text{Cr}+2,0\%\text{TiB}_2+3,0\%\text{Nb}+2,0\%\text{C}+0,7\%\text{Zr}$ ) контактних матеріалів. Вони використовувалися в електромагнітних пускачах ПМЛ – 1100.

Визначені параметри комутації (час горіння дуги і середнє значення струму в дузі) фіксувалося за допомогою осцилограм струму та напруги. Величина струму визначається за спадом напруги на шунті 75ШСМ3-25-05. Осцилограми струму і напруги отримують за допомогою універсального двопробеневого запам'ятовуючого осцилографа С8-14. Похибка вимірних величин не перевищує 5%. Схема приєднання осцилографа до випробувального електричного кола наведена на рис. 2.

Опрацювання результатів дослідження здійснювалося методами математичної статистики з використанням пакета прикладних програм «Statistika» (версія 10.0).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Рівняння теплопровідності для нашого випадку (стаціонарний неоднорідний одновимірний процес) запишеться у вигляді [1]:

$$\frac{dT(x, t)}{dt} = a \cdot \frac{d^2T(x, t)}{dx^2}, \quad (t > 0; 0 < x < \infty), \quad (2)$$

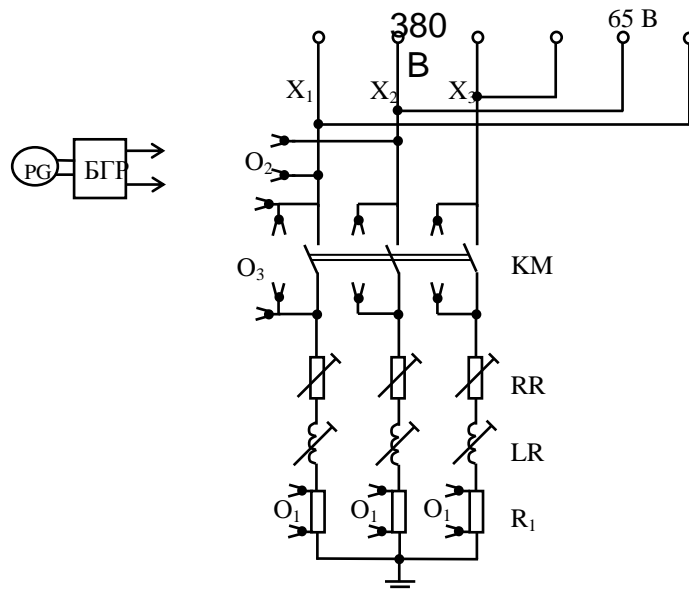
де  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$c$  – питома теплоємність матеріалу контакт-деталі (ізохорна), Дж/кг·К;

$\gamma$  – густина контактного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – час надходження тепла до контакт-деталі, с.



**Рис. 2. Схема приєднання осцилографа С8-14 до випробувального електричного кола:**

$O_1$  – канал осцилографа для запису струму;  $O_2, O_3$  – канали осцилографа для запису напруги; PG – осцилограф;  $R_1$  – шунт; RR – регульовальні резистори; LR – регульовальні котушки індуктивності; БГР – блок гальванічної розв'язки

Розв'язок рівняння (2) дає можливість визначити температуру в будь-якій точці контакт-деталі вздовж осі  $x$  (поздовжня вісь) у кожний визначений момент часу  $t$ , включаючи й точки, які знаходяться на робочій поверхні ( $x=0$ ) у кінці проміжку комутації ( $t=t_0$ ) (рис.1).

Рівняння тепловіддачі з протилежного боку контакт-деталі [1]:

$$\frac{dT(l,t)}{dx} - H \cdot T(l,t) = 0, \quad (3)$$

де  $H = \frac{\alpha}{\lambda}$  – відносний коефіцієнт теплообміну,  $m^{-1}$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $Вт/м^2 \cdot К$ .

Якщо виконується друга гранична умова в процесі комутації (відбувається нормальний процес охолодження), то це відповідає випадку, коли  $H \rightarrow \infty$ .

Температура  $T$  (або перевищення над температурою навколишнього середовища) у будь-якому перерізі контакт-деталі  $x$  по його висоті і в кожний момент часу  $t$  після надходження імпульсу тепла  $Q_1$  у масу контакт-деталі, визначається зі спільного розв'язку рівнянь (2) та (3) [1]. Вважаємо, що температура на поверхні контакт-деталі досягає температури плавлення металу ( $T=T_{пл}$ ) за відрізок часу  $t=t_0$  (при  $x=0$ ), тобто  $T(0; t_0)=T_{пл}$ :

$$T_{пл} = \frac{Q_1}{2 \cdot c \gamma S \cdot \sqrt{\pi a t_0}} \cdot \left( 1 + e^{-\frac{l^2}{a t_0}} \right), \quad (4)$$

де  $S$  – площа робочої поверхні контакт-деталі,  $м^2$ ;

$t_0$  – часу горіння дуги,  $с$ .

З формули (4) можна визначити кількість тепла  $Q_1$ , яке надійшло до контакту за час  $t_0$  і витрачене на нагрівання контакт-деталі до стану плавлення, якщо відома температура плавлення матеріалу контакту  $T_{пл}$ . Крім температури плавлення  $T_{пл}$  і площі робочої поверхні  $S$ , кількість тепла  $Q_1$ , яка йде на нагрівання контакт-деталі, пропорційна квадратному кореню від добутку величини коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$ , теплоємності  $c$  та густини матеріалу  $\gamma$ . Якщо всі ці величини для даного контактного матеріалу постійні, то кількість тепла  $Q_1$ , залежно від часу горіння дуги  $t_0$ , буде дорівнювати:

$$Q_1 = D \cdot \frac{\sqrt{t_0}}{\beta} \cdot T_{пл}, \quad (5)$$

де  $D = \sqrt{\pi c \lambda \gamma} \cdot S = 3,55 \cdot \sqrt{c \lambda \gamma} \cdot S$  – стала величина, яка залежить від теплофізичних властивостей матеріалу і площі робочої поверхні контакт-

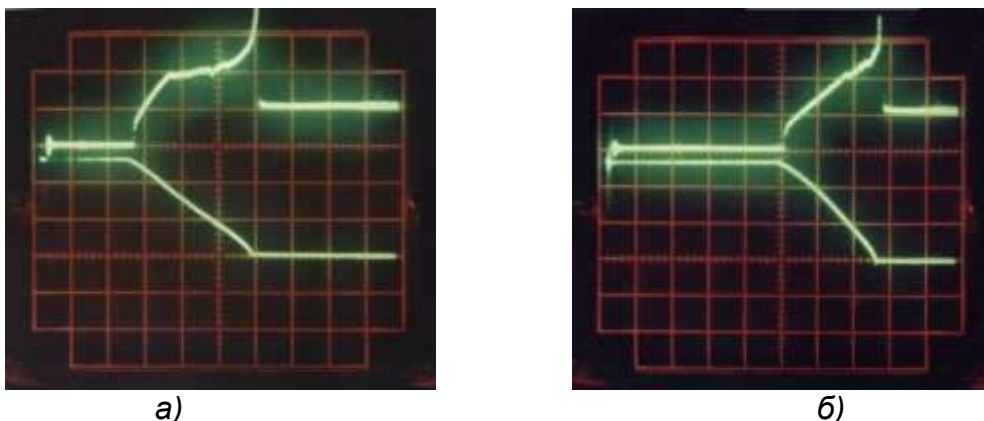
деталі  $S$ ,  $\frac{Вт \cdot с^{\frac{1}{2}}}{К}$ ; (6)

$\beta = 1 + e^{-\frac{\sigma}{t_0}}$  – коефіцієнт, який враховує вплив поздовжніх розмірів контакт-деталі на кількість тепла  $Q_1$ , що поглинається масою  $m_1$ ; (7)

де  $\sigma = \frac{l^2}{a} = \frac{l^2}{\lambda} \cdot c\gamma$  – коефіцієнт, який залежить від розмірів контакт-деталі і теплофізичних параметрів контактного матеріалу (8)

Значення величини  $e^{-\frac{\sigma}{t_0}}$  може змінюватися тільки за різних розмірів контактів ( $0 \leq e^{-\frac{\sigma}{t_0}} \leq 1$ ). Тому знаменник у формулі (5) не може бути більше, ніж 2 (при  $l=0$ ) і менше 1 (при  $l=\infty$ ), тобто:  $1 < \beta < 2$ . Оскільки практично  $t_0$  величина досить мала (мс), то значення  $\beta \approx 1$ . Отже, кількість тепла  $Q_1$ , яка витрачається на нагрівання, можна вважати пропорційна величині кореня квадратного від часу горіння дуги. Збільшення значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , коефіцієнта теплоємності  $c$  та питомої густини  $\gamma$  матеріалу контакт-деталей пускача збільшує постійну  $D$  і тим самим збільшується складова  $Q_1$ .

Час горіння дуги визначається за осцилограмами (рис. 3).



**Рис. 3. Осцилограми електричної дуги розмикання в електромагнітних пускачах ПМЛ–1100:**

а) матеріал  $CrMn_{0,2}+Mn$ ;

б) матеріал  $81,3\%Cu+10\%Cr+2,0\%TiB_2+3,0\%Nb+2,0\%C+0,7\%Zr$ ;

параметри  $U=65V$ ;  $I=10A$ ;  $\tau=40мс$ ;  $L=240мГн$  ( $m_t=10$  мс/под.;  $m_u=50V/под.$ ;  $m_i=0,05V/под.$ )

Визначимо складові енергії електричного кола  $W_R$ , та  $W_L$ :

$$W_R = U_0 I_0 t_0 \cdot \frac{1}{6} \left( 1 + 2 \frac{U_1}{U_0} \right) = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R = P_{сеп} \cdot t_0, \quad (9)$$

де  $U_0$  – напруга мережі (джерела живлення), В;

$I_0$  – струм навантаження, А;

$U_1$  – спад напруги на опорі контакту кола, В.

$$U_1 = I_0 \cdot R_{\text{конт}} = U_0 \cdot \frac{t}{t_0} \cdot A, \quad (10)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження ( $R_0$  і  $L$ ) і від величини часу  $t_0$ ;

$$A = \frac{\left(\frac{t_0 - 1}{t_0}\right)^{\alpha-1} - \alpha}{1 - \alpha}, \quad \alpha = \frac{R_0 t_0}{L} = \frac{t_0}{\tau}, \quad (11)$$

де  $\alpha$  – параметр, який показує відношення активної енергії  $W_R$ , до енергії  $W_L$ , яка накопичена в індуктивностях кола  $L$ ;

$\tau = L/R_0$  – постійна часу (для електричних кіл з постійним струмом), мс;

$$P_{\text{сер}} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0}\right) - \text{середня потужність у контакт-деталях, яка}$$

визначається активною складовою навантаження  $R_0$ , Вт; (12)

$\omega_R = \frac{1}{6} \left(1 + 2 \frac{U_1}{U_0}\right)$  – коефіцієнт, який показує відношення напруг  $U_1$  і  $U_0$ ;

$$W_L = \frac{1}{2} L I_0^2 k = \frac{1}{2} U_0 I_0 t_0 \frac{k}{\alpha} = U_0 I_0 t_0 \frac{k}{2\alpha} = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L, \quad (13)$$

де  $k = 0,6 \div 0,8$  – коефіцієнт, який враховує характер навантаження; при чисто індуктивному навантаженні  $k=1,0$ ; при чисто активному –  $k = 0$  [2];

$\omega_L = \frac{k}{2\alpha}$  – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола;

$$U_0 = I_0 R_0 \text{ і } R_0 t_0 = \alpha L \text{ (формула (11))}.$$

Тоді рівняння (1) можна записати:

$$W = W_R + W_L = P_{\text{сер}} \cdot t_0 + W_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R + U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega, \quad (14)$$

де  $\omega$  – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола і показує долю енергії магнітного поля  $W_L$ , яка витрачається власне в контакт-деталях при їх розмиканні [2].

При чисто індуктивному навантаженні ( $W_R=0$ ,  $P_{\text{сер}}=0$ ) час розмикання контакт-деталей повинен бути більший, ніж:

$$t_1 = \left(\frac{\beta W_L}{DT_{\text{III}}}\right)^2. \quad (15)$$

Тоді не буде відбуватися плавлення робочої поверхні, і все тепло, яке виділяється в контакті під час комутації, буде витрачатися тільки на нагрівання:

$$W = Q = Q_1.$$

Отже, підбираючи час горіння дуги  $t_0$  і враховуючи властивості дослідних матеріалів ( $T_{пл}$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ ,  $c$ ), плавлення контакт-деталей і, власне кажучи, їх ерозію, можна зробити мінімальними.

Якщо відома кількість тепла  $Q$ , яка виділяється під час комутації, а також оптимальний час горіння дуги  $t_0$ , можна визначити втрати електричної енергії та величину електричної ерозії контакт-деталей виготовлених із різних матеріалів, залежно від параметрів електричного кола й характеру навантаження.

Величина електричної енергії  $W_1$ ,  $W_2$ , яка виділяється в головному колі пускачів при розмиканні, визначається згідно з формулою (14). Розрахунок проводиться для одного пускача на один цикл комутації, дані для розрахунку використовуємо з осцилограм. Величина електричної енергії, яка виділяється в одному контакті пускача:

- для серійного пускача:

$$W_1 = U_0 I_0 t_{01} \cdot \omega_1 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 9,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,705 = 4,33 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

- для пускача з дослідними контакт-деталлями:

$$W_2 = U_0 I_0 t_{02} \cdot \omega_2 = 0,065 \text{ кВ} \cdot 10 \text{ А} \cdot 6,44 \cdot 10^{-6} \text{ год} \cdot 0,908 = 4,09 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Зниження втрат електричної енергії для трьох полюсів головного кола пускачів із контактами мостикового типу становить:

$$\Delta W = 6 \cdot (W_1 - W_2) = 6 \cdot (4,33 - 4,09) \cdot 10^{-6} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Тобто, при використанні пускачів із розробленими композиційними матеріалами, економія витрат електроенергії становить майже 6%.

#### **Висновки і перспективи.**

1. Енергія дуги є функцією часу її горіння, який залежить від теплофізичних параметрів матеріалу контактів. Приблизно 20–35% теплової енергії дуги, яка виділяється в контактах, витрачається на плавлення матеріалу контактів, решта – на кипіння.

2. Зменшення часу горіння електричної дуги при комутації струму можна досягти за рахунок введення в композицію таких складових С, Мо, МоО<sub>3</sub>, Сг.

3. Враховуючи характер зміни електроерозійного зносу контактів можна визначити термін служби пускачів та прогнозувати його комутаційну зносостійкість. Термін служби пускачів визначається, у першу чергу, величиною електроерозійного зносу рухомих контакт-деталей.

4. Економічна ефективність застосування пускачів ПМЛ–1100 з дослідними контактами досягається за рахунок значно меншої вартості контакт-деталей (приблизно в 22–25 разів) Для споживача забезпечується зниження втрат на 6% електричної енергії, яка виділяється при комутації струму в контактах.

### Список літератури

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : ГИТЛ, 1967. – 303 с.
2. Томан А. С. Электроэнергетические показатели разрывных контактов / А. С. Томан, М. Ф. Сагач, С. П. Кохановский // Электрификация сельскохозяйственного производства. Научные труды УСХА. – К. : УСХА. – 1975. – Вып. №110, т. II. – С. 61–71.
3. Коробський В. В. Визначення величини ерозії контактів електромагнітних пускачів та реле / В. В. Коробський, А. М. Мрачковський // Вісник ХНТУ сільського господарства. – Х. : ХНТУ, 2012. – Вип. № 130. – С. 125–128.

### References

1. Lyikov, A. V. (1967). Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conductivity]. Moscow: GITL, 303.
2. Toman, A. S., Sagach, M. F., Kohanovskiy, S. P. (1975). Elektroenergeticheskie pokazateli razryivnyih kontaktov [Electricity indicators of breaking contacts]. Nauchnyie trudyi USHA. A series of "Elektrifikatsiya selskohozyaystvennogo proizvodstva." – K.: USHA, 110, II, 61–71.
3. Korobskyy, V. V. Mrachkovskyy, A. M. (2012). Vyznachennia velychyny erozii kontaktiv elektromahnitnykh puskachiv ta rele [Determination of the size of erosion contacts of electromagnetic starters and relays]. Visnyk KhNTU silskoho hospodarstva. – Kharkiv: KhNTU. – Vol. 130, 125–128.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

**В. В. Коробский,  
А. С. Сироштан**

***Аннотация.** Предложена формула для определения величины электрической энергии, которая выделяется за один цикл коммутации в одном контакте и рассчитаны потери электроэнергии при однократной коммутации дуги электромагнитным пускателем с серийными и исследовательскими контактными материалами.*

*Целью исследования является установление взаимосвязи между теплофизическими характеристиками контактного материала, параметрам электрической сети и величиной энергетических потерь при коммутации дуги.*

*Объектами экспериментального исследования выступали контакт-детали, изготовленные из серийного (CrM 0,2 + M1) и исследовательского (81,3% Cu + 10% Cr + 2,0% TiB<sub>2</sub> + 3,0% Nb + 2,0% C + 0,7% Zr) контактных материалов. Они использовались в электромагнитных пускателях ПМЛ–1100.*

*Осциллограммы тока и напряжения получают с помощью универсального двухлучевого запоминающего осциллографа С8-14.*

*Уменьшения времени горения электрической дуги при коммутации тока можно достичь за счет введения в композицию следующих составляющих С, Мо, МоО<sub>3</sub>, Cr. Экономическая*



эффективность применения пускателей ПМЛ–1100 с опытными контактами достигается за счет значительно меньшей стоимости контакт-деталей (примерно в 22–25 раз) Для потребителя обеспечивается снижение потерь на 6% электрической энергии, которая выделяется при коммутации тока в контактах.

**Ключевые слова:** *потери электроэнергии, электрический аппарат, электрическая дуга, контактная система, электромагнитный пускатель, экологически безопасный композиционный материал, металлокерамический контакт*

## ENERGY LOSSES IN COMMUTATION ELECTRIC ARC

V. Korobsky,  
A. Siroshtan

**Abstract.** *The proposed formula for determining the amount of electrical energy that is allocated per one switching cycle in one contact and calculated the loss of electricity for a single switching of the arc by an electromagnetic starter with serial and research contact materials.*

*The aim of the work is to establish the relationship between the thermophysical characteristics of the contact material, the parameters of the electrical network and the magnitude of the energy losses during arc commutation.*

*The objects of the experimental study were contact-parts manufactured from serial (CpM 0.2 + M1) and research (81.3% Cu + 10% Cr + 2.0% TiB<sub>2</sub> + 3.0% + Nb + 2.0% C + 0,7% Zr) of contact materials. They were used in electromagnetic starters PML–1100.*

*Oscillograms of current and voltage are obtained using a universal two-beam storage oscilloscope C8-14.*

*Reduction of the burning time of the electric arc during commutation of the current can be achieved by introducing into the composition the following components C, Mo, MoO<sub>3</sub>, Cr. The economical efficiency of the application of the PML-1100 starters with experienced contacts is achieved due to the significantly lower cost of contact parts (approximately 22 to 25 times). The consumer is provided with a 6 % loss of electrical energy, which is released when switching the current in the contacts.*

**Keywords:** *electric power losses, electric apparatus, electric arc, contact system, electromagnetic starter, environmentally safe composite material, metal-ceramic contact*