

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Валерий Дубровин¹, Евгениуш Красовски², Светлана Тарасенко¹, Семен Волошин¹

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Украина, г. Киев, ул. Героев Обороны, 15

²Польская академия наук

Польша, г. Люблин, ул. Велкопольская, 62

Valeriy Dubrovin¹, Eugeniusz Krasowski², Svetlana Tarasenko¹, Semen Voloshin¹

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Str. Heroiv Oborony, 15, Kiev, Ukraine

²Polish Academy of Sciences

Str. Wielkopolska, 62, 20-725, Lublin, Poland

Аннотация. В работе проведен анализ особенностей работы и видов повреждений силовых контактных соединений электрооборудования. Разработана технология восстановления контактов псевдосплавом МДК-3, представлены основные операции технологии пайки напаек, рассчитан годовой экономический эффект.

Ключевые слова: надежность, контакт, контактное сопротивление, ресурс, износ, стабильность, псевдосплав.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Анализ неисправностей узлов и агрегатов электрооборудования постоянного тока АПК Украины за последние 10 лет показывает, что до 50% отказов присущи электрооборудованию, до 35% причин которых есть неудовлетворительное состояние контактных соединений электроаппаратуры, обзор и ремонт которой составляет 15...25% от общей трудоемкости всего ремонта.

На электрооборудование постоянного тока АПК Украины в качестве силовых контактов традиционно используют медные контакт-детали (губки). Основная причина их отказов это некачественный ремонт, главным фактором которого является дефицит контактных элементов и меди. Как известно, медь, которая применяется при заводском изготовлении элементов и замене изношенных медных губок на ремонтах, есть не наилучшим материалом за износоустойчивостью и переходным сопротивлением. К браковочному размеру дорабатывает лишь 10% всех контактов, их выбраковывают через оплавление и нарушение профиля контакт-

ной рабочей поверхности, образование раковин за счет электроэрозии.

Учитывая вышеизложенное, а также большой дефицит меди в Украине актуальной возникает задача выбора надежного электропроводного материала, как альтернативы “чистой” меди, для его использования в качестве силовых контактов наиболее нагруженных током. Такая задача в силовом аппаратостроении относится впервые как в отечественной, так и в зарубежной практике ремонта и эксплуатации электрооборудования постоянного тока. Поэтому исследование эксплуатационной надежности силовых контактов с восстановленными разными материалами есть актуальной проблемой.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ряд вопросов, которые связаны с эксплуатацией контактов электрических аппаратов, проведен отечественными и зарубежными исследователями [1-20] на предмет исследования износа и восстановление контактов. Выявлено, что за последние 20...30 лет силовые контакты практически не были исследованы. Исследование влияния надежности медных силовых контактов на надежность в условиях эксплуатации не проводились вообще. Проведенный анализ работ [1-20] показывает, что в силовой схеме электрооборудования АПК наиболее уязвимыми есть контакты линейных и реостатных контакторов. Основным показателем, который характеризует надежность работы контакторов, есть

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

срок эксплуатации контакт-деталей (губок) по критерию скорости их износа.

За полученными данными к браковочному размеру (3,5 мм) при постановке новых медных контактов (толщина в рабочей зоне 10 мм) работает всего 10% контактов. К толщине 5 мм, при которой с ремонта электрооборудование выдавать запрещено, работает 20% губок. Сдачу контактных губок выбраковывают через оплавление контактной поверхности – 10%; нарушение профиля рабочей поверхности – 15%. Последние виды повреждений выявляют при ТО-2, 3 или при текущем ремонте и такие контактные губки выбраковывают через 10...18 тыс. часов наработки, что приводит к увеличению объема работ.

Рассматривая общие причины выхода из строя контакт-деталей, можно выделить три их группы: подгорание, стирание, взлом губки, которые обусловлены целым рядом факторов: некачественным контактом губок; креплением контактных губок к контактодержателем; площадью прилегания; качества обработки и зачистки контактов; неправильного расположения подвижных контактов относительно неподвижных, выраженного в малой зоне протекания рабочих токов; и неисправности притирочной пружины, от которой зависит величина контактного давления, которая также не всегда удовлетворяет требованиям правил ремонта.

Таким образом, как вытекает из анализа, ненадежная работа меди, как контактного материала, требует ее замены более качественным материалом.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является повышения эксплуатационной надежности работы и удешевление ремонта силовых контактных соединений электрооборудования постоянного тока АПК путем замены или восстановления медных контактов композиционными материалами (псевдосплавами).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для эксплуатационных испытаний в качестве материалов для напаяк на контакты

были взяты такие материалы (за порядковыми номерами): №1 - композиционный материал (псевдосплав) МДК-3; №2 – композиционный медно-графитовый (порошковый) Мгр; №3 – электролитическое композиционное покрытие типа ФМИ; №4 – медь профильная твердая, типа М1; №5 – медь литая МЛ; №6 – медь профильная твердая, типа М1. С этим материалом исследовали изношенные контакты (для сравнения с новыми).

В работе установлено что, нормативная величина давки F_k главных (силовых) контактов, который равняется 270Н, выдерживается лишь на 50% контакторов; при этом $\overline{F_k} = 274,4H$, а $\sigma_{F_k}^2 = 32,11H$.

С увеличением F_k поверхность контактов становится более тучной и шероховатость S_m уменьшается. Заметное влияние на уменьшение шероховатости имеет также количество включения контактов.

Величина контактного сопротивления R_k не является единой значащей характеристикой контактного соединения потому, что R_k зависит от температуры T контактов, а тепловые процессы в контактном соединении определяют его трудоспособность.

При увеличении убыли напряжения U_k контактного соединения увеличивается T и достигается такое ее значения, при котором начинается размягчения (пластическая деформация) материала контактов, то есть структурная их изменение, которое приводит к изменению механических свойств и дальше к ним сварка, которая приводит к аварийной работе контактного соединения.

Поэтому температура контактного соединения должна быть также (вместе с R_k) обязательно контролируемым параметром.

Согласно нормативным документам Украины ДСТУ 2773-94 для номинального режима работы коммутирующих контактов с меди превышения величины T относительно температуры окружающего среды $T_{н.с.}$ не должно быть большим за +75°C.

Для исследования технологической и токовой стабильности, параметрическую надежность контактов за критериями контактного сопротивления и температуры, получено аналитическое выражение контактного сопротивления контактного соединения силовых контакторов электровозов в виде:

$$R_k = 3,2 \cdot \lg \left[1,43 \left(1 + \frac{\delta}{\ell} \right) \right] \cdot \rho_0 \times$$

$$\times \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \cdot \frac{\ell}{F} +$$

$$+ \frac{\pi \cdot \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \cdot H_{\mu_0}}{10 \left(T_{пл}^{2/3} - T_0^{2/3} \right) \cdot F_k} \times$$

$$\times \frac{\left(T_{пл}^{2/3} - T_0^{2/3} \right) \cdot (S_{m0} - k_1 \cdot F_k)^{2/3}}{0,4 \cdot (R_{a0} - k_2 \cdot F_k)^{2/3}} +$$

$$+ \frac{\sigma}{\left(1 - 0,4 \frac{(R_{a0} - k_2 \cdot F_k)^{2/3}}{(S_{m0} - k_1 \cdot F_k)^{2/3}} \right)} \cdot b \cdot \Delta$$

$$\times \cdot [1 - \alpha(T - T_0)] ,$$

где: T_0 – температура “ненагретых контактов”, “комнатная”, преимущественно +20°C; $T_{пл}$ – температура плавления материала контакт-деталей; δ – толщина проводника (контактного соединения); ℓ – длина контактного соединения; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала при T_0 ; α – температурный коэффициент материала контактов относительно электрического сопротивления; H_{μ_0} – микротвердость материала контактов при T_0 ; S_{m0} – средний шаг начальной неровности микропрофиля поверхности; R_a – среднее арифметическое отклонение микропрофиля поверхности новых контактов; k_1, k_2 – постоянные аппроксимации, которые определяют из экспериментов; F_k – контактное давление.

Числовая оценка R_k при $T = T_0$ для контактов из разных исследуемых в работе материалов по средним значениям величин, которые входят в (1), приведенная в табл. 1.

Поскольку средние значения $\overline{R_k}$ не характеризуют все возможные значения контактного сопротивления, потому что в формулах все величины, за исключением $T_0, T_{пл}, k_1$ и k_2 , являются случайными, а следовательно и R_k носит вероятностный характер, в дальнейшем проанализирована технологическая стабильность R_k для всех видов контактов для $T = T_0$ на основе формулы (1), для чего получено выражение дисперсии контактного сопротивления:

$$\sigma_{R_{k0}}^2 = \left(\frac{\partial R_k}{\partial b} \right)^2 \cdot \sigma_{b0}^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial l} \right)^2 \cdot \sigma_{l0}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial R_k}{\partial \Delta} \right)^2 \cdot \sigma_{\Delta 0}^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial \rho} \right)^2 \cdot \sigma_{\rho 0}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial R_k}{\partial H_{\mu}} \right)^2 \cdot \sigma_{H_{\mu 0}}^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial S_m} \right)^2 \cdot \sigma_{S_{m0}}^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial R_k}{\partial F_k} \right)^2 \cdot \sigma_{F_{k0}}^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial R_a} \right)^2 \times$$

$$\times \sigma_{R_{a0}}^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial \sigma} \right)^2 \cdot \sigma_{\sigma 0}^2 .$$

Таблица 1. Средние значения контактного сопротивления $\overline{R_k}$ при $T_0 = +20^\circ\text{C}$ электрических контактов

Table 1. Average values of contact resistance $\overline{R_k}$ at $T_0 = +20^\circ\text{C}$ of electric contacts

Материал контактов	$\overline{R_k}(T_0), 10^{-6}, \text{Ом.}$
МДК-3	20,93
МГр	39,4
ФМІ	8,02
Медь М1	16,45
Медь МЛ	9,8
Медь М1зн	10,2

Для определения собственного допуска использовались данные, которые были получены в результате натурных опытов. Значение весовых коэффициентов в формуле (2) приведено в табл. 2. Основными параметрами, которые характеризуют трудоспособность электроконтактных пар, есть их контактное сопротивление R_k , температура T и толщина губок b . Но на стадии технологического монтажа контактов температура равняется “комнатной” T_0 , а толщина – толщине новых, не изношенных контактов. Поэтому контролируемым параметром принимается лишь контактное сопротивление R_k . И тогда для оценки параметрической надежности контактов на стадии их сборки была использована одномерная модель отказов типа “нагрузка-прочность”, согласно которой должно быть:

$$R_k \leq R_{кд} , \quad (3)$$

где: $R_k, R_{кд}$ – соответственно текущее (при $T = T_0$) и допустимое значение контактного сопротивления.

Таблица 2. Числовые значения весовых коэффициентов

(знак квадрата опущено) в формуле (2) для $\sigma_{R_{k0}}^2$

Table 2. Numerical values of weight factors (a square sign it is lowered)
in the formula (2) for $\sigma_{R_{k0}}^2$

Материал контактов	Весовые коэффициенты при стандартных отклонениях параметров:								
	σ_{b0}^2	σ_{l0}^2	$\sigma_{\Delta0}^2$	σ_{p0}^2	$\sigma_{H_{\mu0}}^2$	$\sigma_{S_{m0}}^2$	$\sigma_{F_{k0}}^2$	$\sigma_{R_{a0}}^2$	$\sigma_{\sigma0}^2$
МДК-3	0,441	0,44	0,821	0,98	0,158	0,257	0,247	0,012	0,0015
МГр	0,543	0,434	0,824	1,0	0,175	0,29	0,266	0,02	0,001
ФМІ	0,39	0,39	0,824	1,4	0,574	0,872	0,96	0,092	0,0016
М1	1,02	1,02	0,86	0,973	3,09	5,2	5,51	0,376	0,0042
МЛ	0,985	0,98	0,83	1,05	2,92	2,82	2,68	0,386	0,004
М13н	0,48	0,48	0,892	1,02	2,14	3,21	3,23	0,248	0,002

Поскольку обе величины в (3) являются случайными, абсолютное требование использования неравенства (3) не имеет смысла. Возможно лишь поставить условие, чтобы она была выполнена с той или другой вероятностью.

Таким образом, поставленная задача может быть решена в вероятностном трактовании. Введем “функцию трудоспособности” F , которая равняется:

$$F = R_{KД} - R_K > 0. \quad (4)$$

Тогда вероятность нарушения неравенства (3) или, что то и именно, вероятность выхода из порядка контакт-детали за допустимое значение сопротивления $R_{KД}$ определится:

$$V = \int_{-\infty}^0 f(F) dF = \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} f_1(F + R_K) \cdot f_2(R_K) dR_K. \quad (5)$$

Если случайные величины R_K и $R_{KД}$ распределяются за Гауссом, то вероятность V определяется через функцию Лапласа $\Phi(\gamma)$:

$$V = \int_{-\infty}^0 f(F) dF = 1 - \Phi(\gamma), \quad (6)$$

где: γ – характеристика резерва, которая равна:

$$\gamma = \frac{\overline{R_{KД}} - \overline{R_K}}{\sqrt{\sigma_{R_{KД}}^2 + \sigma_{R_K}^2 + 2r_{R_{KД} \cdot R_K} \cdot \sigma_{R_{KД}} \cdot \sigma_{R_K}}}, \quad (7)$$

где: $r_{R_{KД} \cdot R_K}$, $\sigma_{R_{KД}}^2$, $\sigma_{R_K}^2$ – коэффициенты корреляции и дисперсии величин $R_{KД}$ и R_K .

Еще одним показателем надежности контакт-деталей в этом случае введен коэффициент запаса за сопротивлением:

$$K_R = \frac{\overline{R_{KД}}}{R_K}. \quad (8)$$

Вышеизложенные методы дают достаточно точное, но очень трудоёмкое определение вероятности V . Ниже предлагается более простой вид, к тому же он базируется на произвольных законах распределений $f_1(R_{KД})$ и $f_2(R_K)$. Обрывая кривые этих распределений в точке $R_{KД0} = R_{K0}$ и вводя обозначение для малых площадей ω_1 , ω_2 , имеем (рис. 1):

$$\omega_1 = \int_0^{R_{KД0}} f_1(R_{KД}) dR_{KД}, \quad \omega_2 = \int_{R_{KД0}}^{\infty} f_2(R_K) dR_K. \quad (9)$$

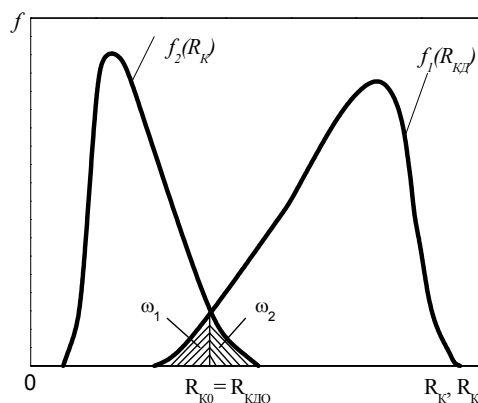


Рис. 1. Законы распределения R_K , $R_{KД}$
Fig. 1. Distribution R_K , $R_{KД}$

Можно доказать, что вероятности отказы V удовлетворяет неравенству:

$$V > \omega_1 \omega_2 \quad (10)$$

при любом выборе значения $R_{K0} = R_{KД0}$. Действительно, произведение $\omega_1 \omega_2$ является вероятностью того, что одновременно $R_K > R_{K0}$ и $R_{KД} < R_{KД0}$; при этом из рассмотрения исключены случайные события $R_K > R_{KД0}$ при

$R_{КД} > R_{КДо}$ или при $R_K < R_{КДо}$, которые также отвечают отказам.

Можно показать, что вероятность безотказной работе Q контактного соединения оценивается как:

$$Q = (1 - \omega_1) \cdot (1 - \omega_2). \quad (11)$$

Соединяя оценки V и Q , получим:

$$\omega_1 \cdot \omega_2 < V < \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \cdot \omega_2. \quad (12)$$

Введем также величину, которая характеризует гарантию безотказной работы контакт-детали:

$$Q = 1 - \omega_1 \cdot \omega_2. \quad (13)$$

Анализ статистического материала по измерением контактного сопротивления (при $T = T_0$) позволил установить, что распределение R_K контактов из материалов МДК и М1 аппроксимируются нормальным законом $f(R_K)$ с достаточно высокой вероятностью P (по критерию Пирсона), что равно соответственно 0,15; 0,2. Коэффициент асимметрии статистических распределений также свидетельствует о близости эмпирических распределений теоретическому закону Гаусса. Значение числовых характеристик \bar{R}_K и σ_{R_K} и показателей надежности на стадии сборки контакты приведены в табл. 3.

Статистические распределения R_K с материалов ФМ1, М1зн, и МГр (рис. 2) с вероятностью $p = 0,12 - 0,26$ (по критерию χ^2 – Пирсона) подчиняются теоретическому распределению вероятности положительных величин.

$$f(R_K) = \frac{1}{\sigma_{R_K} \sqrt{2\pi}} \left(\exp \left[-\frac{(R_K - \bar{R}_K)^2}{\sigma_{R_K}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(R_K + \bar{R}_K)^2}{\sigma_{R_K}^2} \right] \right) \quad (14)$$

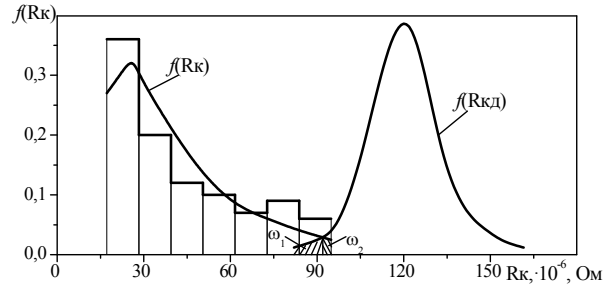


Рис. 2. Распределения $R_K, R_{КД}$ для контактов с материала МГр
Fig. 2. Distribution $R_K, R_{КД}$ for contacts to material МГр

В связи с этим вероятность отказы V этих контактов найденная по выражению (10) согласно рис. 1 и, в качестве примера, на рис. 2 показано определения V для контактов из МГр ($\omega_1 = 0,0085$; $\omega_2 = 0,0071$; $V = \omega_1 \cdot \omega_2 = 5,95 \cdot 10^{-4}$). Численные результаты V приведено в табл. 3, из анализа которой вытекает, что исследуемые материалы и существующая технология регулирования контактов обеспечивают высокие показатели надежности на стадии технологической сборки и монтажа: коэффициент запаса K_R равняется от ~ 2 до 5, а вероятность отказы V даже для контактов с МГр составляет незначительную величину, равную $5,95 \cdot 10^{-4}$, а для МДК – $8,1 \cdot 10^{-13}$.

Таблица 3. Статистические характеристики величины контактного сопротивления и показатели надежности по критерию R_k

Table 3. Statistical characteristics of size of contact resistance and reliability indicators by criterion R_k

Материал	$\bar{R}_k, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\sigma_{R_k}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\bar{R}_k^{max}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\sigma_{R_k^{max}}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\bar{R}_{КД}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\sigma_{R_{КД}}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\bar{R}_{КД}^{min}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	$\sigma_{R_{КД}^{min}}, 10^{-6}, \text{ Ом}$	Показатели надежности		
									K_R	γ	$V, \times 10^{-4}$
МДК-3	21,2	5,9	32,5	3,937	68,25	2,85	62,776	1,902	1,929	6,92	8,1
МГр	41,2	12,6	65,4	8,409	122,1	12,12	98,821	8,089	1,511	2,86	5,95
ФМ1	8,9	2,71	14,1	1,808	88,7	7,23	74,813	4,825	5,304	11,78	0
М1	16,5	4,67	25,5	3,116	73,15	2,05	69,212	1,368	2,717	12,85	0
МЛ	10,1	2,91	15,7	1,942	51,2	2,13	47,109	1,421	3,002	13,05	0
М1зн	11,1	3,42	17,7	2,282	76,8	3,2	70,653	2,1355	3,998	16,95	0

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Заметим, что V для контактов с ФМІ и МІзн равняется нулю, потому что площади под законами распределений $f(R_k)$ и $f(R_{кд})$ не пересекаются и потому, согласно рис. 1, вероятности ω_1 и ω_2 равняются нулю.

В процессе эксплуатации были получены зависимости $R_k(I)$ при 80% и 100% площадях прикосновения $S_{\text{тор}}$ губок, которые свидетельствуют о том, что, во-первых, общий характер изменения $R_k(I)$ таких (изношенных частично) контактов подобный зависимостям $R_k(I)$ для новых контактов.

Во-вторых, степень роста R_k при уменьшении поверхности прикосновения $S_{\text{тр}}$ разная у разных материалов.

Отсюда вытекает важность правильного зачистки и регулирования положения контактов на ремонтах.

Для контактов без дугогасительной камеры сопротивление значительно меньше и приблизительно в 1,5...1,8 раза уменьшается при износе контактов до 5 мм и 3 мм при работе как с дугогасительной камерой, так и без нее.

Установлено также, что сопротивление контактов не остается постоянным в эксплуатации. Анализ показывает, что изменение R_k по времени протекания тока ($I_n=500A$) для исследованных нами контактов отличается от качественных $R_k(t)$ при постепенном увеличении убыли напряжения U_k на контактах, которые приведено в литературе. Полученные в наших опытах $R_k(t)$ и $U_k(t)$ имеют ступене-ниспадающий характер для контактов с дугогасительными камерами и почти неизменные – для контактов без камер. Собственно, и возрастающий, и ниспадающий, и неизменный характеры изменения R_k по времени при повышении температуры T контактного соединения объясняются преимущественно той или другой противоположных действий нагрева материала контактов: увеличением сопротивления металла контактов или уменьшением сопротивления поверхностной пленки. То есть, наблюдается новое явление, которое надо назвать “ступенным В-Фриттингом” в отличие от известного (очевидно, одноступенчатого) “В-Фриттинга”. Закономерности изменения R_k от температуры контактного соединения T идентичны кривым $R_k(I)$ и имеют такое же

объяснение, потому что повышение температуры осуществляли за счет повышения тепловых потерь при росте тока, который протекает через контакты.

Выведена формула изменения в переходном режиме превышения температуры поверхности контакта над температурой окружающей среды в виде:

$$\Theta_k(t) = T(t) - T_0 = \frac{17,8 \cdot 10^3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ко}}^2}{1 - 35,6 \cdot 10^3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ко}}^2 \cdot \alpha} + \frac{R_{\text{то}} I^2}{(B - \alpha R_{\text{то}} I^2)(1 - 35,6 \cdot 10^3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ко}}^2 \cdot \alpha)} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (15)$$

где: $R_{\text{то}}$ – сопротивление тела губок-контактов при температуре T_0 ; Θ – превышение температуры тела контактов над температурой окружающей среды $T_{\text{н.с.}}=T_0$, самое большое значение которой принято 40 C° .

Формула (15) полученная без существующих в литературе предположений, которые $I=\text{const}$, а $\rho \neq f(T)$. В табл. 4 приведено значения перегрева поверхности контактов из разных материалов в переходном режиме, которые найдены при среднем (согласно статистики) и номинальному значениям току.

Для оценки параметрической надежности за критериями контактное сопротивление R_k и температура T (кроме толщины) в работе разработано и применено двухмерную вероятностную модель типа “нагрузка – прочность”, согласно которой контакт-деталь нормально функционирует, если одновременно за определенный срок эксплуатации:

$$R_k \leq R_{кд}, \quad T \leq T_d, \quad (16)$$

или

$$R_{кд} - R_k = H_1 > 0, \quad T_d - T = H_2 > 0. \quad (17)$$

Количественной мерой трудоспособности контактного соединения в этом случае есть вероятность одновременного выполнения обеих условий (17).

То есть задача состоит в нахождении вероятности безотказной работы контактов:

$$\begin{aligned} P_{1,2} &= \text{Имов}(H_1 > 0, H_2 > 0) = \\ &= \text{Имов}[S_1 < H_1 < S_2; S_3 < H_2 < S_4] = \\ &= \int_{S_{1S3}}^{S_2S4} f(h_1, h_2) dh_1 \cdot dh_2, \end{aligned} \quad (18)$$

где: $f(h_1, h_2)$ – плотность совместного распределения величин H_1, H_2 в любой момент времени (или наработки).

Таблица 4. Определение перегрева контактов Θ_k для разных материалов
Table 4. Definition of overheat of contacts Θ_k for different materials

Тип материала	I, А	τ , мин.	$\Theta_{ky}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{ky}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{ky}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{ky}, ^\circ\text{C}$	$\Theta_{ky}, ^\circ\text{C}$
	I_H , А		($t=0$), мин.	($t=10$), мин.	($t=40$), мин.	($t=80$), мин.	($t=100$), мин.
МДК-3	307,8	8,87	0,73	18,18	26,24	26,53	26,53
	500	11,28	1,94	53,52	87,09	89,58	89,65
МГр	307,8	13,34	2,61	40,14	70,06	73,52	73,69
	500	30,48	6,90	132,6	333,5	422,3	446,31
ФМІ	307,8	9,40	0,10	6,45	9,66	9,80	9,80
	500	10,05	0,28	17,54	27,16	27,66	27,67
М1	307,8	8,90	0,45	13,01	18,86	19,06	19,07
	500	10,21	1,20	36,60	56,73	57,85	57,87
МЛ	307,8	8,63	0,16	7,51	10,78	10,88	10,88
	500	9,32	0,42	20,57	30,62	31,03	31,04
М1зн	307,8	8,66	0,17	7,84	11,26	11,37	11,37
	500	9,40	0,46	21,52	32,16	32,61	32,62

В частности, при гауссовому распределении величин H_1, H_2 вероятность $P_{1,2}$ определяется по формуле:

$$P_{1,2} = \frac{1}{2} [\Phi(\gamma_1) + \Phi(\gamma_2)] - O(\gamma_1, \alpha_1) - O(\gamma_2, \alpha_2), \quad (19)$$

где: $\Phi(\gamma), O(\gamma, \alpha)$ – табулированные функции соответственно Лапласа и Оуена;

Вероятность $P_{1,2}$ возможно определить и приблизительно, пользуясь выражением:

$$P_{1,2} = \Phi(\gamma_1)\Phi(\gamma_2) + [\Phi(\gamma_*) - \Phi(\gamma_1)\Phi(\gamma_2)] \times \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin \rho_{12}, \quad (20)$$

где: $\gamma_* = \min(\gamma_1, \gamma_2)$; ρ_{12} – коэффициент корреляции величин H_1 и H_2 .

Используя статистические даны были получены параметры выражений (19), (20), которые позволили определить искомую вероятность $P_{1,2}$ безотказной работы контактов из разных материалов за критериями контактного сопротивления и температуры (с учетом их корреляции) при изменению в эксплуатационных условиях тягового тока через контакты в пределах 50...1500 А. Результаты расчетов $P_{1,2}$ за формулами (19) (числитель) и (20) (знаменатель) приведено в табл. 5. В реальных условиях эксплуатации продолжительность работы контактов даже при $I_H=500\text{A}$ небольшая, поэтому значение $P_{1,2}$ в номинальном тяговом режиме будут выше, чем в табл. 5.

Время эксплуатации наблюдается технологический и эксплуатационный износы контактов; технологический износ слишком

большой. Так, для меди М1 при обработке на станке во время капитального ремонта снимается пласт металла толщиной 1...2, 5 мм, что приводит к потери 5...21 г металла. При обработке напильником при технических осмотрах или периодических ремонтах снимается 0,2...1,3 мм (1,5...2 г), а при обработке контактов, снятых с электрооборудования до 4...8 г меди.

Таблица 5. Вероятность безотказной работы контактов за критериями R_k и T

Table 5. Probability of non-failure operation of contacts behind criteria R_k and T

Материал контактов	$P_{1,2}$	
	МДК-3	0,965
МГр	0,892	0,890
ФМІ	0,892	0,890
М1	0,968	0,970
МЛ	0,967	0,961
М1зн	0,985	0,981

Анализ реализаций изменения толщины b контактов-губок в зависимости от наработки ℓ , свидетельствует что все зависимости $b(\ell)$ являются монотонно-ниспадающими и сильно переплетаются, к тому же изменение $(db/d\ell)$ носит случайный характер и потому весь процесс $b(\ell)$ может рассматриваться, как нестационарный случайный. Поэтому дальнейшая обработка кривых износа вы-

полняли вероятностно-статистическими методами.

Износ контактов также зависит от количества их переключений N и силы тока I , что коммутирует, поэтому в процессе испытаний были определены эти величины.

Аппроксимацию статистических распределений пробега ℓ к отказу контактов осуществляли за следующими теоретическими распределениями: нормальным, логарифмически – нормальным, Вейбулла и гамма-распределением. Проверку соответствия теоретических законов $f(\ell)$ гистограммам вели по критерию Пирсона. В результате установлено, что с вероятностью $P=0,16\dots 0,19$ для контактов с МДК, МГр и М1 и с вероятностью $p=0,14\dots 0,17$ – для контактов из ФМ1, МЛ и М1_{зн} теоретическим распределением $f(\ell)$ есть гамма-распределение, для которого дальше определенная вероятность безотказной работы $P(\ell)$ контактов из разных материалов для наработки L_P электрооборудования постоянного тока по выражению:

$$P(\ell) = I_{\text{мов}}(\ell < L_p) = \int_{L_p}^{\infty} \frac{\lambda^r \cdot \ell^{r-1} \cdot e^{-\lambda \cdot \ell}}{\Gamma(r)} d\ell, \quad (21)$$

где: $\Gamma(r)$ – гамма-функция Ейлера.

Пользуясь экспериментально полученными зависимостями изменения среднего $\bar{b}(\ell)$ и среднеквадратичного $\sigma_b(\ell)$ значений толщины контактов от пробега ℓ выполнено численное вероятностное прогнозирование величины вероятности V_b выхода толщины b за установленный допуск b_D за выведенной формулой (22):

$$V_b = \int_{-\infty}^{b_D} f_{\Sigma}(b) db = \int_{-\infty}^{b_D} \left\{ \frac{1}{L_K - L_0} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_b(\ell)} \times \int_{L_0}^{L_K} \exp \left[-\frac{(b - m_b(\ell))^2}{\sigma_b^2(\ell)} \right] d\ell \right\} db. \quad (22)$$

Таким образом, из прогнозирования вытекает, что контакты из псевдосплава МДК-3

в сравнении с контактами из базового материала (профильной твердой меди М1) в 3,8 раза более надежные по критерию изнашивания. Анализ также показывает, что меньше всего износ (по среднему \bar{b}) наблюдается для контактов с МДК. Контакты из базового материала, твердой профильной меди М1, снашиваются скорее, чем с МДК в 6 раз.

ВЫВОД

Медь в качестве электропроводного материала в силовых разрывных контактах электроаппаратуры постоянного тока владеет низкой коммутационной износоустойчивостью, обуславливает от 21 до 27% отказов электрооборудования, одновременно является дефицитным материалом и потому нуждается в ее замене более надежным и менее дефицитным контактным материалом, в частности, композиционным псевдосплавом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alternativna 2012: Alternativna yenergetika: [navch. posibnik dlya stud. vishch. navch. zakl.] / M.D. Melnichuk, V.O. Dubrovin, V.G. Mironenko, I.P. Grigoryuk, V.M. Polishchuk, G.A. Golub, V.S. Targonya, S.V. Dragnyev, I.V. Svistunova, S.M. Kukharets. – K: «Agrar Media Grup». – 244.
2. Geletukha G.G. 2002: Sovremennyye tekhnologii anaerobnogo sbrazhivaniya biomassy (Obzor) / G.G. Geletukha, S.G. Kobzar // Ekotekhnologii i resursos-berezhniye. – № 4. – 3-8.
3. Boltyanskaya Natalya. 2012: Puti razvitiya otrasli svinovodstva i povysheniye konkurentosposobnosti yeye produktsii / Natalya Boltyanskaya // MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Tom. 14, No 3. – 164-176.
4. Tekhnologi 2010: Tekhnologii Tekhnologii virobnitstva biogazu: [kurs lektsiy dlya stud. silskogosp. vuziv zi spets. 8.092900 – "Ekobiotekhnologiya"] / V.G. Mironenko, V.O. Dubrovin, V.M. Polishchuk, S.V. Dragnyev, I.V. Svistunova. – K.: Kholtekh. – 84.
5. Havrysh Valery. 2011: Perspektivi zabezpechennya agrarnogo sektora yekonomiki Ukraini ponovlyuvanimi yenergetichnimi resursami / Valery Havrysh // MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Tom. 13

- A. – 107-117.
6. Viktoristannya 2008: Viktoristannya bi-omasi na yenergetichni potrebi v silskomu gospodarstvi. Biogazovi tekhnologii. – Doslid-nitske: UkrNDIPVT im. L. Pogorilogo. – 72.
7. Baader V. 1982: Biogaz: teoriya i praktika / V. Baader, Ye. Done, M. Brennderfer. – M.: Kolos. – 148.
8. Bioenergiya 2009: Bioenergiya v Ukraini – rozvitok silskikh teritoriy ta mozhlivosti dlya okremikh gromad: Naukovo-metodichni rekomendatsii shchodo vprovadzhennya perezovogo dosvidu agrarnikh pidpriemstv Polshchi, Lit-vi ta Ukraini zi stvorenniya novitnikh ob'ektiv bioenergetiki, yefektivnogo virobnitstva i vikoristannya biopaliv: [Nauk.-metod. reko-mend.] / [V.O. Dubrovin, M.D. Melnichuk, Yu.F. Melnik, V.G. Mironenko ta in.]. K.: Natsionalniy universitet bioresursiv i prirodokoristuvannya Ukraini; Institut budivnitstva, mekhanizatsii ta yelektrifikatsii sils-kogo gospodarstva, Polshcha, Institut agrar-noi inzhenerii, Litva. – 122.
9. Vedeneyev A.G. 2006: Biogazovye tekhnologii v Kyrgyzskoy respublike: spravochnoye rukovodstvo / A.G. Vedeneyev, T.A. Vedeneyeva. – Bishkek: Yevro. – 90.
10. Malofeyev V.M. 1998: Biotekhnologiya i okhrana okruzhayushchey srede: Uchebnoye posobiye. – M.: Izdatelstvo Arktos. – 188.
11. Tekhnologii 2010: Tekhnologii ta obladnannya dlya vikoristannya ponovlyuvanikh dzherel yenerгии v silskogospodarskomu virobnitstvi / Za red. V.I. Kravchuka, V.O. Dubrovina – Doslidnitske.: UkrNDIPVT im. L. Pogorilogo. – 184.
12. Vedeneyev A.G. 2006: Stroitelstvo biogazovykh ustanovok: kratkoye rukovodstvo / A.G. Vedeneyev, A.N. Maslov. – Bishkek: Yevro. – 28.
13. Biologichni 2010: Biologichni resursi i tekhnologii virobnitstva biopaliva: Monog-rafiya / Ya.B. Blyum, G.G. Geletukha, I.P. Grigoryuk,, K.V. Dmitruk, V.O. Dubrovin, A.I. Emets, G.M. Zabarniy, G.M. Kaletnik, M.D. Melnichuk, V.G. Mironenko, D.B. Rakhmetov, A.A. Sabirniy, S.P. Tsigankov – K.: "Agrar Media Grup". – 408.
14. Eder B. 2006: Biogazovyye ustanovki. Prakticheskoye posobiye / Barbara Eder, Khaynts Shults. – M.: Kolos. – 240.
15. Biogaz 2010: Biogaz na osnove vozobnovlyayemogo syrya. Sravnitelnyy analiz shestidesyati odnoy ustanovki po proizvodstvu biogaza v Germanii. – Gyultsov. Germaniya: Spetsialnoye agentstvo vozobnovlyayemykh resursov (FNR). – 116.
16. GOST 2011: GOST R 53790-2010: Ne-traditsionnyye tekhnologii. Energetika biotkhodov. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya k biogazovym ustanovkam. – [Deystvitelen ot 2010-05-31]. – M.: Standartinform – 10. – (Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii).
17. Ratushnyak G.S. 2008: Teplovtrati v biogazovikh ustanovkakh pri riznikh temperaturnikh rezhimakh anayerobnogo brodinnya / G.S. Rakushnyak, K.V. Anokhina // Visnik Vinnitskogo politekhnichnogo institutu. – № 5. – 20-24.
18. Protsesi 2008: Protsesi ta aparati biotekhnologichnikh virobnitstv. Chastina 2. Metodichni vkazivki do vikonannya laboratornikh robit z distsiplin " Protsesi ta aparati biotekhnologichnikh virobnitstv" ta "Energiobiotekhnologiya" dlya studentiv silskogospodarskikh vishchikh navchalnikh zakladiv 3-4 rivniv akreditatsii zi spetsialnosti 6.092900 "Ekobiotekhnologiya" / M.D. Mel-nichuk, V.G. Mironenko, V.M. Polishchuk ta in. – K.: Vidavniy tsestr NAU. – 38.
19. Mashini 2012: Mashini ta ob-ladnannya silskogospodarskogo virobnitstva. Metodichni vkazivki do vi-konannya laboratornikh robit z distsiplin "Mashini ta obladnannya silskogospodarskogo virobnitstva" dlya studentiv silskogospodarskikh vishchikh navchalnikh zakladiv 3-4 rivniv akreditatsii osvithno-kvalifikatsiynogo rivnya "Bakalavr" na-pryamku pidgotovki "Mashinobuduvannya" / M.D. Mel-nichuk, V.O. Dubrovin, V.G. Mironenko, V.M. Polishchuk, G.A. Golub, V.S. Targonya, O.I. Eremenko, S.V. Dragnev. – K.: Vidavniy tsestr NUBiP Ukraini. – 36.
20. Yenergiobiotekhnologiya 2010: Yenergiobiotekhnologiya. Metodichni vkazivki do vikonannya laboratornikh robit z distsiplini "Energiobiotekhnologiya" dlya studentiv silskogospodarskikh vishchikh navchalnikh zakladiv 3-4 rivniv akreditatsii zi spetsialnosti 6.092900 "Ekobiotekhnologiya" / M.D. Melnichuk, V.G. Mironenko, V.M. Polishchuk ta in. – K.: Vidavniy tsestr NAU. – 28.
21. Polishchuk V.M. 2012: Yekspres-metod viznachennya teplotvornoї zdatnosti biogazu /

V.M. Polishchuk, V.Є. Vasilenkov, M.M. Lobodko, V.S. Voloshin // Naukoviy visnik Natsionalnogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannya: Zb. nauk. prats. – Kiiv. – № 174. Ch. 2 – 258-263.

**OPERATIONAL RELIABILITY
OF POWER CONTACT CONNECTIONS
OF ELECTRIC EQUIPMENT**

Summary. In paper the analysis of features of work and kinds of damages of power contact connections of an electric equipment is carried out. The technology of restoration of contacts is developed by pseudo-alloy МДК-3, the basic operations of technology of the soldering surfacing are presented, annual economic benefit is calculated.

Key words: reliability, contact, contact resistance, resource, wear, stability, pseudo-alloy.