

УДК 621.3.019.3

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ОБЖИМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

И. С. Васильев¹, С. Б. Сунцов¹, С. В. Ефремов¹, В. С. Ким²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: vasilyev_is@sibmail.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: kim_vs@rambler.ru

В ходе испытаний обжимных электрических соединений получен ряд характеристик. На основе результатов испытаний выполнен расчет переходного электрического сопротивления нового типа электрических соединительных элементов бортовой кабельной сети современных космических аппаратов. Проведен учет причин возникновения переходного сопротивления для реальных конструкций обжимных соединительных элементов. Результаты расчета сравнены с данными измерений переходных сопротивлений. Предлагается использовать полученные данные для построения модели старения обжимных электрических контактов, применимой к новым конструктивным решениям.

Ключевые слова: испытания, обжимные электрические соединения, бортовая кабельная сеть, надежность, полуэмпирическая модель.

TESTING OF CRIMPED ELECTRIC CONNECTIONS IN ON-BOARD DC HARNESS OF SPACECRAFT FOR DETERMINATION OF THEIR PROPERTIES

I. S. Vasilyev¹, S. B. Suntsov¹, S. V. Efremov¹, V. S. Kim²

¹ JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: vasilyev_is@sibmail.com

²Tomsk National Research Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation E-mail: kim_vs@rambler.ru

Some performances have been obtained as the result of testing of crimped electrical connections. On the basis of test results performance calculate transient electrical resistance of the new type of electric connection items implemented in on-board DC harness of modern spacecrafts. The causes of appearance of transient resistance in actual designs of crimped connection items were taken into account. The calculation results are compared to the transient resistance measurements. It is proposed to use the obtained data when building a model of crimped electrical connections ageing, applicable to new design solutions.

Keywords: tests, crimped electrical connections, on-board DC harness, reliability, semiempirical model.

Проведение испытаний технического устройства является обязательной частью процесса изготовления продукции. Испытания можно разделить на несколько основных групп [1]:

- предварительные испытания;
- предъявительские испытания;
- приемосдаточные испытания;
- периодические испытания;
- типовые испытания.

Все испытания учитывают влияние внешних воздействующих факторов (ВВФ) и включают ряд методов контроля, направленных на мониторинг изменения характеристик. Проведение испытаний позволяет подтвердить соответствие качества изготавливаемой продукции и допустить ее дальнейшую эксплуатацию. Для вновь разрабатываемых изделий, а также

при необходимости эксплуатации в более жестких условиях, проводят дополнительный вид испытаний на определение надежности изделия. Эти испытания более длительны по времени и требуют большего объема выборки испытываемых образцов. Они позволяют определить максимальный ресурс изделия и свести к минимуму вероятность возникновения нештатных ситуаций в пределах срока активного существования (САС). Особое значение такие испытания приобретают в случае штучных или мелкосерийных изделий, к которым относятся изделия космического назначения. В отличие от других видов испытаний, испытание на надежность является разовым, но его результаты распространяются на все изделия данного конструктивного исполнения.

В настоящее время ОАО «ИСС» является лидером в России по объему и качеству изготавливаемых космических аппаратов (КА). Достижение такого высокого результата возможно лишь при комплексном подходе к проектированию, изготовлению и испытанию продукции. На протяжении многих лет в ОАО «ИСС» постоянно проводятся испытания изделий и материалов с целью определения как качества изготовленной продукции, так и степени изменений в материалах, используемых при изготовлении КА под воздействием ВВФ. Существенное место в обеспечении длительного САС КА занимают испытания на надежность как отдельных элементов, так и целых блоков каждого изделия.

КА является сложным многокомпонентным техническим устройством, включающим множество систем. Одной из таких систем является бортовая кабельная сеть (БКС) КА, которая выполняет связующую функцию между бортовыми системами, обеспечивая электропитание и обмен информацией. Фактически, обеспечение надежности БКС является базовым фактором для обеспечения штатного функционирования всего КА. В свою очередь, надежность функционирования БКС зависит от надежности всех ее элементов, среди которых наиболее уязвимыми являются электрические соединители.

В начале 2000-х гг. ОАО «ИСС» одним из первых в России применило новый тип электрических соединителей с извлекаемыми обжимными контактами и обжимные срутки в БКС КА. Это позволило повысить технологичность производства и сократить время изготовления БКС. При заданных условиях эксплуатации надежность данных обжимных элементов обеспечивает САС не менее 15 лет. К сожалению, период летной эксплуатации обжимных соединительных элементов пока недостаточен для того, чтобы на его основе сделать вывод об их реальном максимальном ресурсе. С целью оценки реального ресурса новых соединительных элементов и возможности применения их в более жестких условиях, в ОАО «ИСС» проводятся сравнительные испытания на старение обжимных и традиционных паяных соединений. Эти испытания позволяют также собрать данные, необходимые для построения полуэмпирической модели, применимой к новым конструктивным решениям. В данной работе представлены результаты теоретического

описания характеристик обжимных контактов в сравнении с данными экспериментальных измерений.

При изготовлении обжимных соединений проводятся контрольные испытания на падение напряжения, на прочность при растяжении и металлографическое исследование [2].

Результаты данных испытаний для 6 различных образцов обжимных соединений приведены в табл. 1 [3]. Результаты испытаний механических и электрических характеристик показывают, что обжимные соединения полностью удовлетворяют существующим требованиям [2].

Расчет переходного сопротивления обжимного контакта. Одной из основных характеристик электрического контакта является величина переходного сопротивления. Проведем расчет исходного переходного сопротивления, учитывающий реальные условия изготовления обжимных соединений. Такой расчет необходим для задания начальных условий при моделировании изменения переходного сопротивления контактов под воздействием условий эксплуатации.

Рассчитаем необходимую величину усилия обжатия P_k [4], которая соответствует номерам позиции ручки переключателя обжимного инструмента и геометрическим параметрам обжимаемых материалов:

$$P_k = 1,05 \cdot \sigma_s \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{d} \right) \cdot l_0 \right] = 1078 \text{ Н/мм}^2, \quad (1)$$

где σ_s – предел текучести, МПа (для медного сплава $\sigma_s = 340$ МПа [5]); f – коэффициент сухого трения (для медного сплава $f = 1,35$ [6]); l_0 – длина области хвостовика контакта, мм, на которую рабочей частью обжимной матрицы прикладывается обжимное усилие ($l_0 = 1,9$ мм); d – внешний диаметр хвостовика контакта, мм ($d = 1,73$ мм [7]); S – толщина стенки хвостовика контакта, мм ($S = 0,53$ мм, определяется согласно [7]).

Обжимной инструмент создает обжимное усилие одновременно в 8 точках в 4 областях по периметру хвостовика контакта в соответствии с рис. 1, где 1 – это электрический контакт соединителя; 2 – токопроводящие жилы обжимаемого провода; 3 – контрольное отверстие; 4 – изоляция провода; l_0 – длина участка хвостовика контакта, на которое прикладывается обжимное усилие; l_{np} – длина участка, с которого происходит контрольное измерение падения напряжения согласно [2].

Таблица 1

Результаты контрольных испытаний для образцов обжимных контактов соединителей

№ образца	Падение напряжения в образцах, мВ	Величина испытательного тока, А [2]	Продольное усилие, Н	Металлография
	Не более 4 мВ [2]		Не менее 45 Н [2]	Степень пустот не более 10 % [2]
1	1,4	5	54,63	–
2	1,7	5	53,29	–
3	2,1	5	52,00	–
4	1,8	5	–	3,55
5	1,4	5	–	6,4
6	2,0	5	–	4,4

Известно [8], что электрический ток протекает в зоне контакта не по всей кажущейся площади контакта, а через так называемые области а-пятен, являющихся точками непосредственного металлического контакта двух поверхностей и имеющих величину электрического сопротивления стягивания R_c . Теоретически переходное электрическое сопротивление $R_{пер}$ в области обжатия можно представить как сумму параллельных сопротивлений стягивания R_c n -го числа а-пятен (рис. 2).

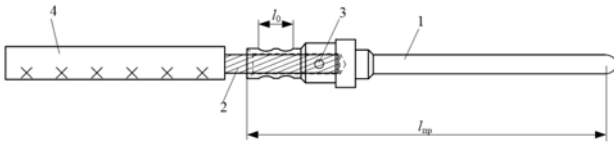


Рис. 1

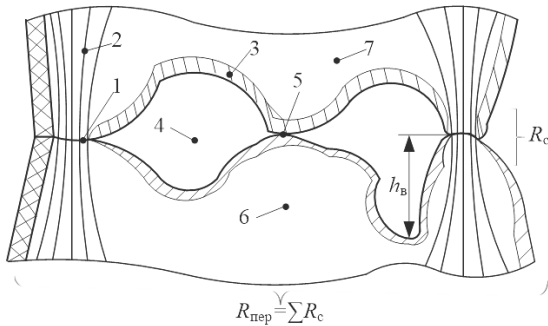


Рис. 2

На рис. 2: 1 – это области а-пятен с непосредственным металлическим контактом, имеющие сопротивление стягивания; 2 – линии тока; 3 – поверхностная окисная пленка; 4 – области отсутствия контакта; 5 – области квазиметаллического контакта; 6 – металл токопроводящей жилы; 7 – металл хвостовика контакта; h_b – максимальная теоретическая высота микровыступов контактных поверхностей.

Рассчитаем характеристики контактирующих поверхностей. Известно, что общее сопротивление электрического контакта $R_{к.общ}$ является суммой двух сопротивлений [9]:

– собственное электрическое сопротивление $R_{l,пр}$ соединяемых материалов, измеренное на длине $l_{пр}$, соответствующей требованиям [2];

– сопротивление $R_{пер}$ в зоне перехода «хвостовик контакта – обжимаемый провод», которое представляет собой сумму сопротивлений стягивания R_c .

Величину $R_{к.общ}$ можно определить из закона Ома, зная падение напряжения и испытательный ток (см. табл. 1). Теоретическое сопротивление на длине измеряемого участка $R_{l,пр}$ рассчитаем, зная геометрические параметры обжимаемых контактов и проводов. Величину $R_{пер}$ найдем как разницу $R_{к.общ}$ и $R_{l,пр}$. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Так как $R_{пер}$ фактически представляет собой сумму параллельных сопротивлений стягивания R_c , соответственно, зная величину давления F_k [МПа/мм²], полученную после преобразования обжимного усилия P_k

из (1) и используя значение твердости по Бринеллю медного сплава в МПа/мм², можно рассчитать теоретическое количество точек а-пятен в области обжатия [10]:

$$R_{пер} = \sum R_c = \frac{\rho \cdot k}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot HB}{N \cdot F_k}} \text{ [Ом]}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление меди, Ом·м ($\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); k – коэффициент преобразования удельного сопротивления для медного проводника сечением 1 мм² ($k = 10^6$); HB – твердость медного сплава по Бринеллю.

Таблица 2

Результаты расчета электрических сопротивлений обжимных контактов соединителей

№ образца	Величина сопротивления $R_{к.общ}$, Ом	Расчетная величина сопротивления $R_{l,пр}$, Ом	Переходное сопротивление i -контакта $R_{пер}$, Ом
1	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
2	$3,4 \cdot 10^{-4}$		$2,37 \cdot 10^{-4}$
3	$4,2 \cdot 10^{-4}$		$3,17 \cdot 10^{-4}$
4	$3,6 \cdot 10^{-4}$		$2,57 \cdot 10^{-4}$
5	$2,8 \cdot 10^{-4}$		$1,77 \cdot 10^{-4}$
6	$4,0 \cdot 10^{-4}$		$2,97 \cdot 10^{-4}$

Из (2) найдем число а-пятен в области обжатия N :

$$N = \frac{\pi \cdot k \cdot \rho^2 \cdot HB}{4 \cdot R_{пер}^2 \cdot F_k}. \quad (3)$$

Согласно [10], выражение (3) можно представить в виде

$$R_{пер} = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot N \cdot a_n} \text{ [Ом]}. \quad (4)$$

Тогда теоретический средний радиус а-пятна в области обжатия a_n

$$a_n = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot N \cdot R_{пер}} \text{ [мм]}. \quad (5)$$

Используя выражение (4), определим среднюю величину сопротивления стягивания R_c одного а-пятна для i -го образца контакта:

$$R_c = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot a_n} \text{ [Ом]}. \quad (6)$$

Согласно [9], для $R_{пер}$ можно записать:

$$R_{пер} = \frac{0,12 \cdot \rho \cdot k \cdot E \cdot h_b}{P_k \cdot (1 - \mu)} \text{ [Ом]}, \quad (7)$$

откуда можно определить среднюю высоту h_b микровыступов на контактной поверхности:

$$h_b = \frac{R_{пер} \cdot P_k \cdot (1 - \mu)}{0,12 \cdot \rho \cdot k \cdot E} \text{ [мм]}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости, ГПа (для медного сплава $E = 120$ ГПа [5]); P_k – прилагаемое обжимное усилие, Н/мм²; μ – коэффициент Пуассона (для медного сплава $\mu = 0,34$ [5]).

Результаты расчетов теоретических параметров а-пятен в области обжатия для 6 образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета характеристик контактной поверхности обжимных контактов соединителей

№ образца	Количество а-пятен	Средний радиус а-пятен, мм	Средняя площадь а-пятна, мм ²	Сопротивление стягивания R_c одного а-пятна, Ом	Средняя высота микровыступов h_v , мм
1	2341	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,355 \cdot 10^{-3}$	0,415	$5,0 \cdot 10^{-4}$
2	1306	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,427 \cdot 10^{-3}$	0,310	$6,7 \cdot 10^{-4}$
3	730	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$4,340 \cdot 10^{-3}$	0,232	$8,9 \cdot 10^{-4}$
4	1111	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,854 \cdot 10^{-3}$	0,286	$7,3 \cdot 10^{-4}$
5	2341	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,355 \cdot 10^{-3}$	0,415	$5,0 \cdot 10^{-4}$
6	832	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,810 \cdot 10^{-3}$	0,248	$8,4 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4

Величина электрического сопротивления обжимных сростков $R_{к.общ}$ в зависимости от числа термоциклов

№ образца	$R_{к.общ}$, Ом							$R_{к.общ}$, %, на 622 цикле к циклу 0
	Цикл 0	Цикл 103	Цикл 209	Цикл 300	Цикл 404	Цикл 531	Цикл 622	
Ср1	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,45 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	-0,930
Ср2	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,361 \cdot 10^{-4}$	$4,359 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	-0,685
Ср3	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$4,312 \cdot 10^{-4}$	$4,308 \cdot 10^{-4}$	$4,314 \cdot 10^{-4}$	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-4}$	-1,15
Ср4	$4,31 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	-1,39
Ср5	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	-1,13

Измерение электрического сопротивления обжимных контактов. В ОАО «ИСС» проводятся испытания обжимных сростков, соединяющих провода в кабелях-типопредставителях, с целью определения допустимых условий их эксплуатации при максимально возможном САС. Испытания на надежность направлены на контроль изменения электрического сопротивления в области обжатия сростка и провода. Условия эксплуатации имитируются термоциклированием в термовакuumной камере в диапазоне квалификационных температур от -110 до +120 °С при давлении 10^{-5} Па. Образцы обжимных сростков постоянно находятся под токовой нагрузкой. В настоящее время проведено 622 цикла изменения температуры. Контроль изменения электрических характеристик производился примерно через 100 термоциклов. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Для наглядности средние значения электрического сопротивления $R_{к.общ}$ испытуемых образцов представлены в виде графиков. Пример графика зависимости электрического сопротивления $R_{к.общ}$ по 5 образцам от количества термоциклов показан на рис. 3.

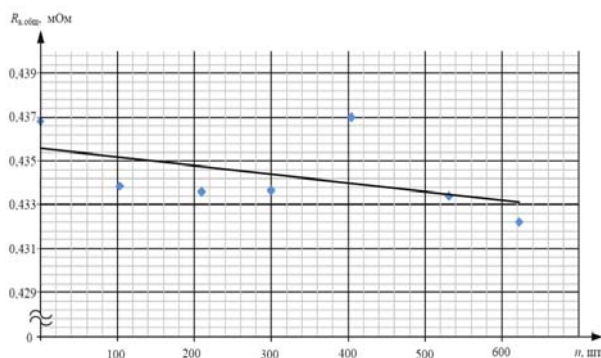


Рис. 3

Как видно из табл. 4, среднее уменьшение контактного сопротивления в образцах по итогам проведенного этапа испытаний составило порядка 1 %, что указывает на высокую устойчивость обжимных электрических соединений к воздействию знакопеременных температур в условиях вакуума в течение длительного времени.

Результаты контрольных операций по определению механических и электрических характеристик обжимных электрических контактов показывают, что обжимные соединения полностью удовлетворяют существующим требованиям [2]. Испытания обжимных электрических контактов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, показали устойчивость характеристик контактной области обжимных сростков к влиянию внешних факторов.

Результаты расчета сопротивления обжимного контакта находятся в качественном согласии с данными измерений и в пределах одного порядка значений. Необходимо отметить, что отличия (менее 30 %) расчетных значений $R_{к.общ}$ для разных образцов в табл. 2 обусловлены различием конструкционного исполнения соединительных элементов, допусками в длине $\Delta l_{пр} = (\pm 3-5)$ мм, с которой происходит измерение падения напряжения, разным типом обжимаемых проводов, величина поперечного сечения которых отличается в два раза. В табл. 4 приведены измеренные значения $R_{к.общ}$ для образцов обжимных сростков и проводов одного типа и сечения. Как видно из табл. 4, разброс значений $R_{к.общ}$ до старения (цикл 0) между образцами не более 3 %.

В целом можно констатировать, что результаты расчета неплохо согласуются с измерениями величины $R_{к.общ}$. Измеренные значения в табл. 4 систематически завышены по сравнению с расчетными в табл. 2 в пределах 50 %. Это может быть вызвано тем, что в расчете не учитывается влияние оксидных пленок

и структурных изменений токопроводящего металла при обжимке на величину сопротивления. Таким образом, для повышения точности модели необходимо учитывать структурные и геометрические параметры обжимных соединений.

Результаты расчета количества контактных точек, средней площади а-пятен и сопротивления стягивания R_c а-пятна в области обжатия отражают состояние обжимных соединительных элементов на стадии изготовления. Для построения модели изменения характеристик контакта необходимо провести расчет изменения площади а-пятен в ходе эксплуатации. Такая модель позволит прогнозировать изменение переходного сопротивления новых конструктивных решений обжимных соединений, выполненных из различных металлов, и оценивать их максимально возможный ресурс с меньшими экономическими затратами.

Библиографические ссылки

- ГОСТ РВ 15.307-2002. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Испытания и приемка серийных изделий. Основные положения. 2004. 32 с.
- ECSS-Q-ST-70-26C. Гарантирование космической продукции. Обжимка высоконадежных электрических соединений / Европейская Кооперация по Космической стандартизации. 2008. 41 с.
- Васильев И. С., Ким В. С., Ефремов С. В. Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети перспективных космических аппаратов // Наукоеведение : сетевой журн. 2013. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-3-13-technics>.
- Пат. № 2366049. Российская Федерация. Способ опрессовки кабельных наконечников методом радиального прессования / Леонтьев И. В., Гусев Л. Г., Кузьмин В. В. Оpubл. 27.08.2009, Бюл. № 24.
- Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. 2-е изд. М. : Металлургия, 1973. 224 с.
- Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1956.
- Детальная спецификация ESCC № 3401 005. Контакты, электрические, обжимные для соединителей 3401/002. 5-е изд. Июнь. 2009. 18 с.
- Хольм Р. Электрические контакты. М. : Изд-во иностранной литературы, 1961.
- Бондаренко И. Б., Гатчин Ю. А., Иванова Н. Ю., Шилкин Д. А. Соединители и коммутационные устройства : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.
- Сафонов А., Сафонов Л. Радиочастотные электрические соединители. Вопросы теории и состояния

развития производства // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5.

References

- GOST RV 15.307-2002. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voennaja tehnika. Ispytanija i priemka serijnyh izdelij. Osnovnye polozhenija [GOST RV 15.307-2002. System development and putting into production. Military equipment. Tests and acceptance of serial products . Key provisions]. 2004. 32 p.
- ECSS-Q-ST-70-26C. Garantirovanie kosmicheskoy produkcii. Obzhimka vysokonadezhnyh jelektricheskij soedinenij. Evropejskaja Kooperacija po Kosmicheskij standartizacii [ECSS-Q-ST- 70 -26C. Guaranteeing space products . Swage highly electrical connections. European Cooperation for Space Standardization]. 2008. 41 p.
- Vasilyev I. S., Kim V. S., Efremov S. V. [Reliability of the electrical connections onboard cabling advanced spacecraft]. *Naukovedeni*. 2013. no. 3. (In Russ.) Available at: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-3-13-technics>.
- Leont'ev I. V., Gusev L. G., Kuz'min V. V. *Sposob opressovki kabel'nyh nakonechnikov metodom radial'nogo pressovanija* [Method of crimping ferrules by radial compression]. Patent RF, no. 2366049, 2009.
- Tret'jakov A. V., Zjuzin V. I. *Mehanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* (The mechanical properties of metals and alloys by pressure treatment). 2nd ed. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 224 p.
- Kragel'skij I. V., Shhedrov V.S. *Razvitie nauki o trenii. Suhoe trenie* (Development of the science of friction. Dry friction). Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1956.
- Detal'naja specifikacija ESCC № 3401 005. Kontakty, jelektricheskie, obzhimnye dlja soedinitelej 3401/002 [Detailed specification ESCC № 005 3401. Contacts, electrical crimp connectors for 3401/002]. 5th ed. June 2009. 18 p.
- Hol'm R. *Elektricheskie kontakty* (Electrical contacts). Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ., 1961.
- Bondarenko I. B., Gatchin Ju. A., Ivanova N. Ju., Shilkin D. A. *Soediniteli i kommutacionnye ustrojstva* (Connectors and switchgear). Proc. allowance. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Information Technologies, 2007. 151 p.
- Safonov A., Safonov L. [RF connectors. The theory and the state of development of production]. *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*. 2010, no. 5.

© Васильев И. С., Сунцов С. Б.,
Ефремов С. В., Ким В. С., 2014