

УДК 621.316.015.4

В. В. МИЦУН, Л. Н. ЛЕНСКАЯ, В. И. ГОЛУБ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИОДОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОНТАКТОВ, КОММУТИРУЮЩИХ ИНДУКТИВНЫЕ НАГРУЗКИ

Рассматриваются вопросы защиты контактов при коммутации индуктивных нагрузок.

Показывается, что при коммутации индуктивных нагрузок, шунтированных диодами, износостойкость контактов при токах, меньших пределов дугообразования, равна износостойкости при коммутации активных нагрузок.

Выключение цепей, содержащих индуктивность, сопровождается, как правило, появлением в межконтактном зазоре газового разряда, приводящего к обгоранию и разрушению контактной поверхности. Поэтому устранение газового разряда в межконтактном зазоре при размыкании контактами индуктивных нагрузок является желательным для увеличения полезного срока службы контактов и их надежности.

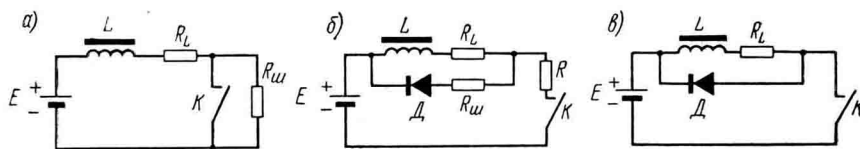


Рис. 1. Схемы защиты контактов.

До появления полупроводниковых приборов для защиты контактов применялись линейные резисторы. Защита контактов резисторами (рис. 1, а) применяется и в настоящее время. Резисторы подключаются параллельно контактам, шунтируют их и в момент размыкания индуктивной нагрузки не позволяют развиваться на контактах высокому напряжению. Чем меньше сопротивление шунтирующего резистора, тем лучше он защищает контакты. Но уменьшать сопротивление резистора можно до определенного предела, так как протекающий через резистор ток может оказаться достаточным для срабатывания электромагнитных

механизмов, часто используемых в качестве индуктивных нагрузок. Кроме того, шунтирующий резистор потребляет энергию, что также является недостатком этого способа защиты контактов.

Эти недостатки устраняются, если параллельно индуктивной нагрузке подключить диод (в непроводящем направлении) последовательно с шунтирующим резистором (рис. 1, б). Диод будет препятствовать протеканию установившегося тока через $R_{ш}$ в том же направлении, что и ток в R_L , и пропускать импульсы тока от индуктивности в противоположном направлении при размыкании контактов [1].

Ценность применения выпрямителя в искрогасительной цепи состоит в том, что напряжение на контактах после размыкания индуктивной нагрузки [2, 3] отличается от источника питания незначительно. При коммутации без искрогашения в межконтактном зазоре могут возникнуть газовые разряды различных видов: дуговой, тлеющий, ливневый или их комбинации. Возникновение их обусловлено многими факторами, важнейшими из которых являются тип, режим и параметры нагрузки, материал контактов и конструкция реле, а также окружающие условия.

Электрическая дуга на размыкающихся контактах, сопровождаемая ярким свечением, разогревом материала контактов и термоэлектронной эмиссией, вызывает дуговую эрозию.

Для каждого контактного материала имеются определенные значения тока I_m и напряжения U_m [1], ниже которых в межконтактном зазоре (при данных атмосферных условиях) не может существовать дуга.

В табл. 1 приведены минимальные напряжения и токи дуги для некоторых контактных материалов.

Таблица 1

	Контактный материал					Состояние контактных поверхностей	Источник
	Au	Au — Ni (5%)	Ag	Pt	Pt — Ir (10%)		
Минимальное напряжение U_m , в	15	—	12	17	—	Влажность 45%	5
	15	—	12	17	20		6
	11,5—15	15	12	15—17,5	20		7
	15	15	12	17	20		1
	—	—	12	—	—	Окислены	3
	—	—	10	14	—		8
Минимальный ток I_m , а	0,38	—	0,4	0,9	—	Влажность 45%	5
	0,38	—	0,4	0,9	0,74		6
	0,38	0,4	0,3—0,4	0,7—1,0	0,8—1,1		7
	0,38	0,38	0,4	0,9	0,74		1
	—	—	0,25	—	—	Окислены	3
	—	—	0,38	0,38	—		8

Дуговой разряд в межконтактном зазоре будет отсутствовать [3]:

$$i_k (U_k - U_m) \leq I_m U_k$$

где i_k — ток, проходящий через контакты к моменту размыкания; U_k — напряжение на контактах после их размыкания; I_m и U_m — постоянные материала контактов.

Для серебряных контактов анализ выражения [3] показал, что при напряжении и токе выше предела дугообразования невозможно полностью погасить дугу в межконтактном зазоре при размыкании индуктивной нагрузки, шунтированной искрогасящей цепью из диода и резистора.

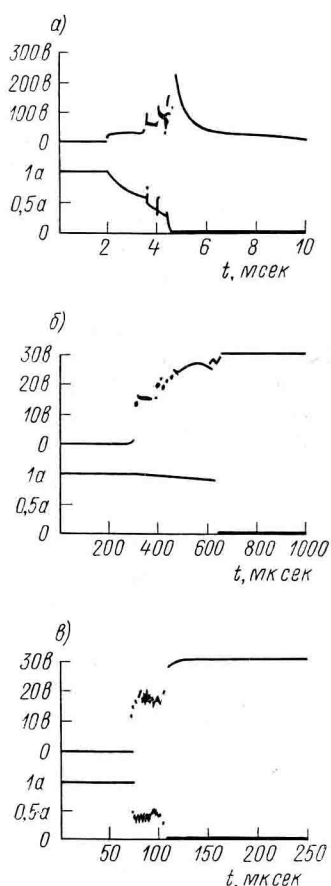


Рис. 2. Напряжение и ток на контактах реле РЭС9 (3л 999,9), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 1а:

а—индуктивная нагрузка ($\tau=15$ мсек);
б—индуктивная нагрузка ($\tau=15$ мсек),
шунтированная диодом Д7Ж; в—активная нагрузка.

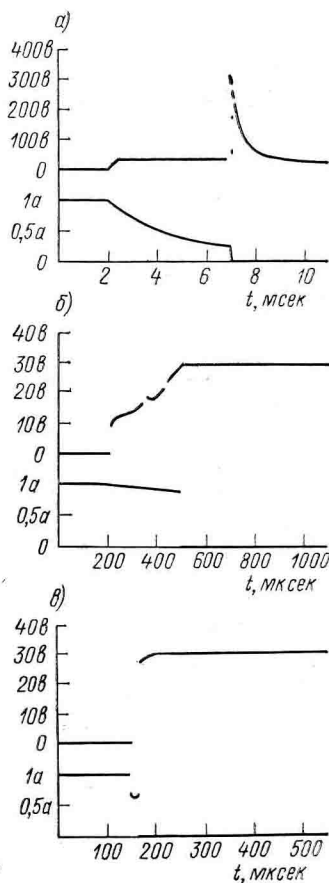


Рис. 3. Напряжение и ток на контактах реле РЭС9 (Ср999), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 1а:

а—индуктивная нагрузка ($\tau=15$ мсек);
б—индуктивная нагрузка ($\tau=15$ мсек),
шунтированная диодом Д7Ж; в—активная нагрузка.

При отключении индуктивных нагрузок с током $I_k < I_m$ в нагрузке происходит резкое уменьшение магнитного потока и за счет э. д. с. самоиндукции возникает тлеющий или ливневый разряд. Длительность газового разряда зависит от параметров цепи. Если напряжение источника питания меньше напряжения зажигания тлеющего или ливневого разряда, то при шунтировании нагрузки диодом эти формы разряда в межконтактном зазоре не должны наблюдаться.

Основное разрушение контактов при коммутации индуктивных нагрузок происходит при размыкании контактов, а при замыкании эрозия

незначительна, поэтому достаточно ограничиться сравнением процессов размыкания индуктивных, активных и индуктивных нагрузок, шунтированных диодом, чтобы оценить эффективность применения диодов для защиты контактов.

Осциллограммы напряжений на контактах при размыкании индуктивных, активных и индуктивных нагрузок, шунтированных диодом, как с токами более I_m , так и при меньших значениях, приведены на рис. 2÷7.

На рис. 2 представлена осциллограмма напряжения и тока при размыкании исследуемых нагрузок в режиме 30 в и 1 а золотыми контактами реле РЭС9. При размыкании индуктивной нагрузки (дроссель

на шихтованном сердечнике, $\tau = 15$ мсек) в межконтактном зазоре в течение 2,5 мсек горит дуга (рис. 2, а), которая затем переходит в тлеющий разряд, продолжающийся примерно 100 мсек. Подключение параллельно индуктивной нагрузке диода Д7Ж приводит к исчезновению тлеющего разряда при размыкании контактов (рис. 2, б) и уменьшению времени горения дуги

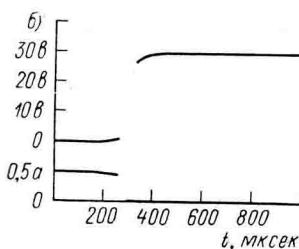
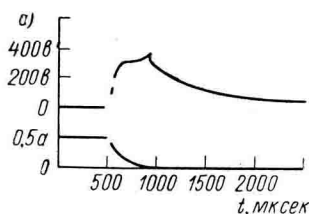
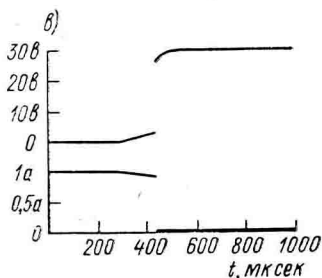
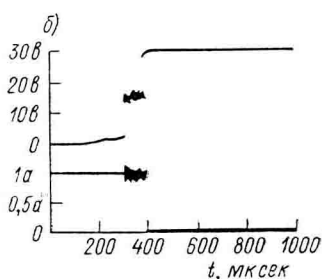
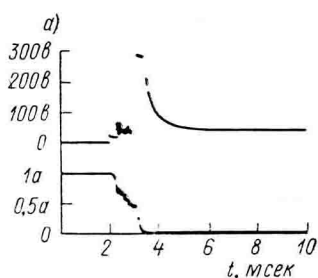


Рис. 4. Напряжение и ток на контактах реле РЭС10 (ПЛИ-10), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 1 а:

а — индуктивная нагрузка ($\tau = 15$ мсек);
б — индуктивная нагрузка ($\tau = 15$ мсек), шунтированная диодом Д237А; в — активная нагрузка.

Рис. 5. Напряжение и ток на контактах реле РЭС10 (ПЛИ-10), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 0,5 а:

а — индуктивная нагрузка; б — индуктивная нагрузка ($\tau = 15$ мсек), шунтированная диодом Д237А, или активная нагрузка.

до 350 мсек. Однако время горения дуги при размыкании индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, значительно превосходит длительность дуги (30 мсек) при размыкании активной нагрузки (рис. 2, в).

Для серебряных контактов реле РЭС9 при тех же самых нагрузках характер переходных процессов в межконтактном зазоре сохраняется,

зажигается дуга (рис. 3, а) и тлеющий разряд так же, как и при размыкании индуктивной нагрузки золотыми контактами (рис. 2, а). При шунтировании индуктивной нагрузки диодом Д7Ж тлеющий разряд исчезает (рис. 3, б), а дуга горит большее время, чем при размыкании активной нагрузки (рис. 3, в) в этом же режиме.

Когда контакты из сплава ПЛИ-10 реле РЭС10 размыкают индуктивную нагрузку ($\tau=15$ мсек) с током 1 а, в межконтактном зазоре в течение 1 мсек горит дуга и 400 мсек длится тлеющий разряд (рис. 4, а). При шунтировании индуктивной нагрузки диодом Д237А (рис. 4, б), в межконтактном зазоре горит дуга в продолжение 100 мсек, а при размыкании активной нагрузки (рис. 4, в) она отсутствует.

Как уже ранее отмечалось, для зажигания в межконтактном зазоре дуги необходимо, чтобы ток и напряжение на контактах были не меньше I_m и U_m .

На рис. 5, а показана осциллограмма тока и напряжения при размыкании индуктивной нагрузки ($\tau=15$ мсек) с током 0,5 а при напряжении 30 в. Из осциллограммы видно, что с момента расхождения контактов реле РЭС10 (ПЛИ-10) в межконтактном зазоре в течение 400 мсек горит тлеющий разряд. Минимальное значение тока, необходимое для возникновения дуги (табл. 1), по крайней мере должно быть 0,7 а. В данном случае ток через контакты равен 0,5 а и дуга не возникает. При шунтировании индуктивной нагрузки диодом Д237А газовый разряд в межконтактном зазоре так же, как и при размыкании активной нагрузки, не возникает (рис. 5, в).

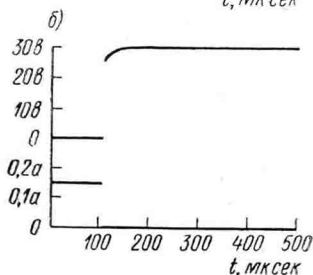
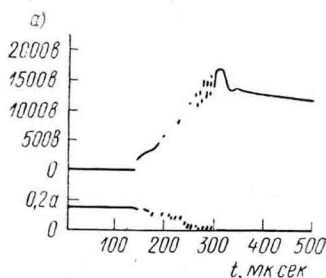


Рис. 6. Напряжение и ток на контактах реле РЭС10 (Зл999,9), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 0,15 а:

а — индуктивная нагрузка ($\tau=15$ мсек);
б — индуктивная нагрузка ($\tau=7,5$ мсек), шунтированная диодом Д223А, или активная нагрузка.

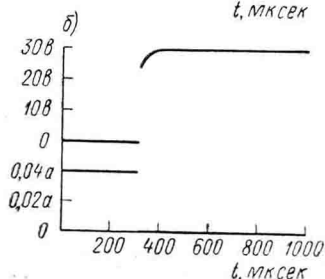
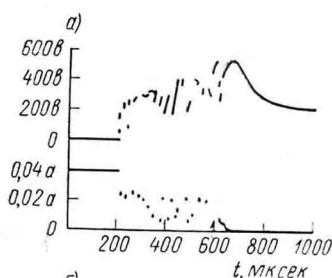


Рис. 7. Напряжение и ток на контактах реле РЭС34 (Зл999,9), размыкающих нагрузку в режиме 30 в; 0,04 а:

а — индуктивная нагрузка ($\tau=40$ мсек);
б — индуктивная нагрузка ($\tau=40$ мсек), шунтированная диодом Д220, или активная нагрузка.

Как видно из осциллограммы напряжения и тока (рис. 6, а), при размыкании контактами реле РЭС10 (Зл 999,9) обмотки реле РС3 в режиме 30 в и 0,15 а дуга в межконтактном зазоре отсутствует, но зажигается тлеющий разряд, который через 50 мсек переходит в ливневый.

Отдельные импульсы напряжения достигают при ливневом разряде 1500 в, однако при шунтировании индуктивной нагрузки диодом Д237А тлеющий и ливневый разряды исчезают и процессы размыкания (рис. 6, б) аналогичны переходным процессам при размыкании активной нагрузки с током 0,15 а при напряжении 30 в.

Ливневый разряд, возникающий в межконтактном зазоре РЭС34

(Зл999,9) при размыкании контактами индуктивной нагрузки с током 0,04 а при напряжении 30 в и постоянной времени 40 мсек (рис. 7, а), также подавляется, если нагрузку шунтировать (рис. 7, б) диодом Д220.

Таким образом, исследование процессов размыкания контактами индуктивных нагрузок, индуктивных нагрузок, шунтированных диодами, и активных нагрузок показывает, что при размыкании индуктивной нагрузки с током и напряжением выше пределов дугообразования контактного материала, шунтирование диодом приводит к значительному уменьшению времени горения дуги в межконтактном промежутке при размыкании контактов. Однако эта дуга горит значительно большее время, чем дуга при размыкании активной нагрузки.

Если же ток нагрузки меньше предела дугообразования материала контактов, то переходные процессы на контактах, размыкающих индуктивную нагрузку, шунтированную диодом, и активную нагрузку совпадают. Следовательно, должна быть одинаковой износоустойчивость контактов при коммутации активной и индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, при токах, меньших предела дугообразования материала контактов.

Экспериментальная проверка на износоустойчивость контактов из сплавов ПЛИ-10, СрМгНк и Зл 999,9 коммутировавших активные и индуктивные нагрузки,

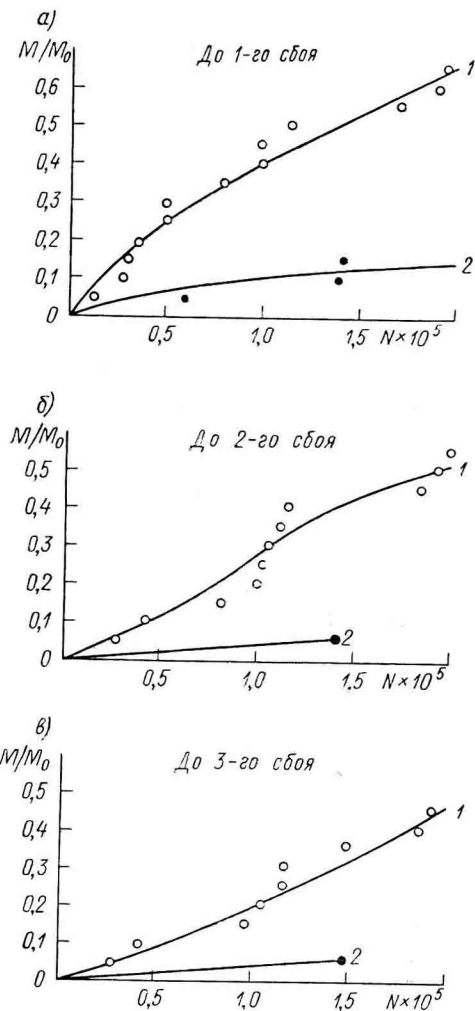


Рис. 8. Распределение моментов появления n -го сбоя контактов реле типа РЭС10 в процессе коммутации в условиях повышенной температуры (100°C) в режиме 30 в; 0,15 а:

1—нагрузка—реле РЭС3; 2—нагрузка—активное сопротивление 200 ом; 3—нагрузка—реле РЭС3 с параллельно подключенным диодом Д223 (сбоев нет).

шунтированные диодами, с токами, меньшими пределов дугообразования, полностью подтвердилась.

Из 24 реле РЭС10 (ПЛИ-10), коммутировавших в режиме 30 в и 0,5 а индуктивную нагрузку ($\tau=15$ мсек), шунтированную диодом

Д237А, четыре реле в пределах $2 \cdot 10^5$ коммутаций имели единичные сбои, а при коммутации активной нагрузки сбои наблюдались у двух реле.

При коммутации контактами реле РЭС47 (СрМгНк) в режиме 30 в и 0,25 а индуктивной нагрузки ($\tau = 15$ мсек), шунтированной диодом Д7Ж, ни одно из 12 испытуемых реле в пределах $2 \cdot 10^5$ коммутаций не имело сбоев, а при коммутации активной нагрузки единичные сбои наблюдались только у одного реле.

Эффективность применения диодов для защиты контактов становится особенно наглядной, если сравнить результаты испытаний контактов на износостойчивость при коммутации индуктивной нагрузки, индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, и активной нагрузки. На рис. 8 показано распределение моментов появления n -го сбоя контактов реле РЭС10 (Зл999,9) при коммутации обмотки реле РС3 ($\tau = 7,5$ мсек), этой же индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, и активной нагрузки в режиме 30 в и 0,15 а в пределах $2 \cdot 10^5$ коммутаций.

Распределение моментов появления сбоев свидетельствует о том, что при коммутации обмотки реле РС3 из 20 испытуемых образцов у 13 реле наблюдались сбои в пределах $2 \cdot 10^5$ коммутаций. Одиннадцать реле имели по 2 сбоя. При шунтировании обмотки реле РС3 диодом сбои контактов не наблюдались, а при коммутации активной нагрузки только три реле имели сбои, причем один образец имел три сбоя в пределах $2 \cdot 10^5$ коммутаций. Периодические измерения сопротивления контактов реле РЭС10 (ПлИ-10), РЭС47 (СрМгНк) и реле РЭС10 (Зл999,9) в процессе коммутации активной и индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, показали, что сопротивление контактов при коммутации индуктивной нагрузки, шунтированной диодом, совпадает с сопротивлением контактов при коммутации активной нагрузки.

Таким образом, действительно, при шунтировании диодом индуктивной нагрузки с током ниже предела дугообразования износостойчивость контактов реле выше, чем при коммутации индуктивной нагрузки, не шунтированной диодом, и практически одинакова с износостойчивостью контактов при коммутации активной нагрузки при том же токе и напряжении.

Однако необходимо отметить, что шунтирование индуктивной нагрузки диодом приводит к изменению временных характеристик нагрузки. Например, если индуктивная нагрузка представляет собой обмотку реле, то шунтирование ее диодом приводит к значительному увеличению времени отпускания реле.

В табл. 2 показано время срабатывания и отпускания некоторых образцов реле с шунтированием и без шунтирования обмоток реле разными диодами. Из таблицы видно, что время срабатывания реле с шунтированием обмоток отличается незначительно от времени срабатывания без шунтирования, а время отпускания увеличивается в несколько раз. Время отпускания реле складывается из времени трогания, перелета якоря и дребезга вплоть до полного замыкания якоря с контактами.

При шунтировании обмоток реле диодом замедление действия реле происходит за счет увеличения времени трогания и перелета якоря.

Для сохранения временных характеристик реле можно последовательно с диодом включить стабилитрон [4], при этом эффективность защиты контактов не изменяется.

Таблица 2

Реле	Диоды	Время срабатывания, мсек				Время отпускания, мсек			
		трога- ния	дребез- га	переле- та	дребез- га	трога- ния	дребез- га	переле- та	дребез- га
РЭС10 п РС4 524 302	—	2,0	0,1	0,6	0,9	0,7	1,5	0,3	1,5
	Д 104	2,0	0,05	0,6	1,0	3,2	1,1	0,45	1,1
	Д 7Ж	2,0	0,05	0,61	1,0	3,4	1,2	0,5	1,2
	Д 220Б	2,1	0,05	0,6	1,0	3,3	1,1	0,5	1,1
	Д 226	2,1	0,05	0,63	1,1	3,3	1,1	0,5	1,1
РЭС10 п РС4 524 314	—	0,75	0,05	1,1	1,12	0,73	—	0,40	7,3
	Д 104	0,5	0,05	1,45	1,55	4,4	—	0,8	7,8
	Д 220Б	0,5	0,05	1,45	1,60	4,3	—	0,8	7,6
	Д 7Ж	0,5	0,05	1,45	1,55	4,4	—	0,8	7,8
	Д 226	0,5	0,05	1,45	1,60	4,3	—	0,8	7,6
РЭС34 п РС4 524 376	—	1,8	—	1,05	0,45	0,71	—	0,33	1,2
	Д 226	2,0	—	0,8	0,7	3,7	—	1,2	0,8
	Д 237А	2,0	—	0,8	0,7	3,7	—	1,2	0,8
	Д 105	2,1	—	0,8	0,7	3,8	—	1,2	0,9
РЭС47 п РФ4 500 417	1—2—3	—	—	0,25	0,8	0,88	—	0,33	2,0
		Д 105	—	0,2	0,7	3,70	—	0,7	1,5
		Д 223	—	0,25	0,7	3,90	—	0,6	1,5
		Д 237А	—	0,2	0,7	3,80	—	0,6	1,5
	4—5—6	—	—	0,2	1,3	0,88	—	0,3	1,8
		Д 237А	—	0,3	1,3	3,80	—	0,7	0,9
		Д 223	—	0,3	1,5	3,90	—	0,6	1,0
		Д 105	—	0,25	1,5	3,80	—	0,7	0,9
	3—4—5	—	—	0,15	0,55	0,15	—	0,3	3,8
		Д 105	—	0,15	0,6	0,4	—	0,8	2,5
		Д 220	—	0,1	0,6	0,3	—	0,9	2,7
РЭС9 п РС4 524 200	6—7—8	—	—	0,45	0,28	1,2	—	0,31	3,5
		Д 220	—	0,1	0,7	6,2	—	0,9	2,8
		Д 7Ж	—	0,1	0,65	0,3	—	0,9	2,8
	3—4—5	—	—	0,05	0,45	0,65	—	0,38	3,5
		Д 237А	—	0,1	0,6	0,8	—	1,3	2,8
		Д 226	—	0,1	0,8	0,8	—	1,3	2,8
РЭС9 п РС4 524 201	6—7—8	—	—	0,6	0,6	0,88	—	0,46	3,5
		Д 226	—	0,8	0,3	4,8	—	1,5	3,0
		Д 237А	—	0,7	0,5	4,4	—	1,5	3,0
	3—4—5	—	—	0,7	0,5	4,5	—	1,5	3,0
		Д 237А	—	0,1	0,6	0,8	—	1,2	2,8
		Д 7Ж	—	0,1	0,6	0,8	—	1,2	2,8
РЭС9 п РС4 524 213	3—4—5	—	—	0,25	0,95	0,73	—	0,31	1,4
		Д 226	—	0,15	1,3	4,8	—	0,5	1,2
		Д 237А	—	0,20	1,2	4,9	—	0,5	1,1
		Д 7Ж	—	0,15	1,2	4,9	—	0,5	1,1
	6—7—8	—	—	0,26	0,95	0,71	—	0,32	1,9
		Д 7Ж	—	0,15	1,2	4,9	—	0,5	1,1
		Д 237А	—	0,1	1,2	4,9	—	0,5	1,1
		Д 226	—	0,15	1,2	4,9	—	0,5	1,1
	3—4—5	—	—	0,25	0,95	0,73	—	0,31	1,4
		Д 226	—	0,15	1,3	4,8	—	0,5	1,2
		Д 237А	—	0,20	1,2	4,9	—	0,5	1,1
		Д 7Ж	—	0,15	1,2	4,9	—	0,5	1,1

ЛИТЕРАТУРА

1. Хольм Р. Электрические контакты. ИЛ, 1961.
2. Разумихин М. А. Эрозионная устойчивость маломощных контактов. Изд. «Энергия», 1964.
3. Власов А. Д. Искрогасительные контуры с вентильными элементами. Сб. «Вестник связи», № 9, 1949.
4. Hollmann J. Bestimmung der Sperschalttemperatur in Kontaktschutzdioden BAW 21, Automatik, Bd. 4, April, 1972.
5. Сотсков Б. С. Электромагнитные реле. Госэнергоиздат, 1958.
6. Буль Б. К. и др. Основы теории электрических аппаратов. Изд. «Высшая школа», 1970.
7. Маркович А. Я., Писнер М. Н. Построение и расчет релейно-контактных схем. Изд. «Связь», 1971.
8. Усов В. В. Исследование новых материалов для контактов релейного типа. Труды ВЭИ, вып. 44, 1940.

Статья поступила 28 декабря 1972 г.
