УДК 621.3.066.5/6:636

Розрахунок глибини проплавлення контактів електромагнітних пускачів, що виготовлені з екологічно безпечних контактних матеріалів

В. В. Коробський, А. М. Мрачковський

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

Наведено результати розрахунків глибини проплавлення контакт-деталей електромагнітних пускачів для найбільш поширених контактних матеріалів при однократній комутації струму. Струмові навантаження вибирають (для пускачів 1 і 2 величини), виходячи із тезису, що номінальні робочі струми пускачів є: 4; 6,3 та 10 А. Формула для визначення глибини проплавлення отримана при рішенні рівняння теплопровідності з урахуванням граничних умов II роду.

***Ключові слова**: глибина проплавлення, контакт, електромагнітний пускач, температура, теплопровідність, контактний матеріал.*

Вся електрична енергія W, яка виділяється в комутуючих пристроях при комутації, перетворюється в теплову Q. Частина її (Q_1) витрачається на нагрівання 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 розплавленного металу до температури кипіння і на випаровування частини металу. Енергія W має дві складові: одну — прямо пропорційну часу горіння дуги t_0, яка обумовлюється активним навантаженням кола — W_R, та другу — постійну — W_L, що дорівнює енергії магнітного поля, накопиченої в індуктивностях електричного кола, і витрачається в комутуючих пристроях при комутації.

Тому, розглядаючи теплові і електромагнітні процеси для одного полюса пускача, можна записати [1]

$$W = Q = Q_1 + Q_2 = W_R + W_L = D_{\text{пад}} t_0 + W_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_R + U_0 I_0 t_0 \cdot \omega_L = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega, \quad (1)$$

де $D_{\text{пад}} = \frac{1}{6} U_0 I_0 \left(1 + 2\frac{U_1}{U_0}\right)$ — середня потужність в контакт-деталях, яка визначається активною складовою навантаження R_0, Вт; U_0 — напруга мережі (джерела живлення), В; I_0 — струм навантаження, А; U_1 — спад напруги на опорі контакту кола, В; ω_R — коефіцієнт, який показує відношення напруг U_1 і U_0; ω_L — коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола; ω — коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола і показує долю енергії магнітного поля W_L, яка витрачається в контакт-деталях при їх розмиканні [2].

За формою більшість контакт-деталей пускачів виготовляються круглого перерізу з плоскою або сферичною робочою поверхнею, причому діаметр d значно перевищує висоту l контакт-деталі (рис. 1). Тому при однократній комутації контакт-деталей будемо вважати, що тепловіддача здійснюється з протилежної сторони робочої поверхні (зі сторони прикріплення до контактотримача) в 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 S. Тепло надходить перпендикулярно до поверхні і теплопровідність у всіх напрямках однакова. Тривалість імпульсів тепла Q_1 дорівнює часу горіння електричної дуги між електродами t_0 (приблизно часу однократного замикання або розмикання контакт-деталей) (Q_1 — тепло, необхідне для нагрівання контакт-деталі до температури плавлення).

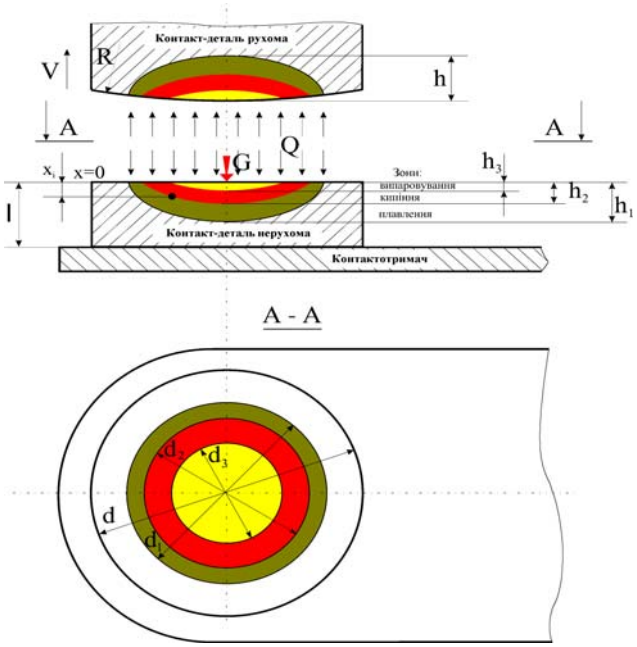


Рис. 1. Схематичне зображення глибини проплавлення h
контакт-деталей пускача при однократній комутації струму.

Граничні умови:

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

$T(l, t) = 0$ (температура точок протилежної сторони деталі при $x = l$ також дорівнює температурі середовища і вона є сталою величиною).

За умови, що ізотермічні поверхні є концентричними сферами і температура контакт-деталі залежить тільки від координати x і часу t [1], рівняння теплопровідності має вигляд

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{dT}{dx} \right), \tag{2}$$

де T — температура точок об'єму контакт-деталі, яка нагрівається, К; a — коефіцієнт температуропровідності контактного матеріалу, м^2/с.

У випадку дії плоского джерела тепла (рис. 1) розв'язком рівняння (2) є вираз

$$T = \frac{G}{2\sqrt{\pi a t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}} \tag{3}$$

де G — сила імпульсного джерела тепла, яке розміщене в площині розмикання контакт-деталей безпосередньо на поверхні при $x = 0$ (густина теплового потоку, який надходить до однієї контакт-деталі), м·К; x — координата точки, температура якої в момент t дорівнює T (рис. 1).

Згідно з формулою (3) визначається розподіл температур в об'ємі контакт-деталі, який викликаний джерелом тепла силою G, що розташований на площині при $x = 0$. Кількість тепла q (Дж/м^2), яка виділяється з одиниці площі плоского джерела між двома контакт-деталями, дорівнює

$$q = \frac{Q}{2f_0} = \frac{W}{2f_0} = G \cdot \gamma \cdot c, \tag{4}$$

де Q — теплова енергія, яка надходить у контактну пару, кал (Дж); f_0 — площа контактної поверхні розплавленої лунки (умовна площа контактування), м^2 (рис. 1); W — кількість електричної енергії (енергія дуги), Дж.

Протягом комутації густина теплового потоку на поверхні однієї контакт-деталі складає

$$G = \frac{W}{2\gamma c f_0} \tag{5}$$

Розв'язавши рівняння теплопровідності (2), знаходимо розподіл температури T на глибину x від поверхні контакт-деталі за час t. Для визначення глибини проплавлення h вводиться поняття

“ефективної температури”. Ефективна температура $T_{еф}$ — температура, до якої був би нагрітий розплавлений метал контакт-деталі при затратах на це теплоти, що зумовлена (визначається) скритою теплотою плавлення:

$$m_1 c_1 T_{еф} = m_1 g_1, \tag{6}$$

де c_1 — теплоємність розплавленого металу, Дж/кг·К; g_1 — скрита теплота плавлення, Дж/кг.

З достатньою ймовірністю для наших розрахунків вважається, що теплоємність c_1 дорівнює теплоємності нерозплавленого (холодного) металу, тобто $c = c_1$. Тоді ефективна температура

$$T_{еф} = \frac{g_1}{c}. \tag{7}$$

Доведення до температури плавлення $T_{пл}$ і самого плавлення маси металу контакт-деталі m_1 рівноцінно доведенню до загальної температури плавлення T і ефективної температури $T_{еф}$ всієї розплавленої маси m_1. Тобто розрахункова температура плавлення

$$T_{1розр} = T_{пл} + T_{еф} = T_{пл} + \frac{g_1}{c}. \tag{8}$$

Межа в тілі контакт-деталі, температура точок якої досягла $T_{1розр}$, обмежує розплавлену частину металу і є фактично глибиною лунки розплавлення h_1. Глибина цієї лунки визначається координатою x (рівняння (3)). Частина металу в лунці буде доведена теплом Q_2 до температури кипіння $T_{кип}$. В цьому випадку розрахункову температуру кипіння знаходять так:

$$T_{2розр} = T_{кип} + \frac{g_2}{c_1} \tag{9}$$

де g_2 — прихована теплота випаровування матеріалу контакт-деталі (пароутворення), Дж/кг.

При цьому межі лунки h_2, в якій метал кипить, будуть визначатися теж координатою x, але меншою, ніж h_1. Для металу, який випаровується, — межа лунки h_3 ($h_3 < h_2 < h_1$).

Загальна розрахункова температура випаровування матеріалу

$$T_{3розр} = T_{кип} + \frac{g_1}{c} + \frac{g_2}{c_1}. \tag{10}$$

Розв’язок рівняння теплопровідності (3) має вигляд

$$e^{\frac{h_i^2}{4at}} = \frac{T_{iрозр} \cdot 2\sqrt{\pi a t_0}}{G} \tag{11}$$

де h_i — глибина зони плавлення або кипіння або випаровування, координата точок, температура яких досягає $T_{iрозр}$ до кінця часу горіння дуги t_0.

Використовуючи співвідношення (5), отримаємо

$$e^{\frac{h^2}{4at}} = \frac{W}{4\sqrt{\pi a t_0 \cdot \gamma c f_0 T_{розр}}} \tag{12}$$

де $W = U_0 I_0 t_0 \cdot \omega$ — з формули (1).

Площа контактної поверхні при плавленні f_0 залежить від глибини проплавлення h. Jones F. L. експериментально встановив співвідношення між розмірами розплавленої зони [3]:

$$h_1 = 0{,}3 d_1 \tag{13}$$

де d_1 — діаметр розплавленої зони.

Тоді, роблячи деякі допущення, знаходимо

$$f_0 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{h_1}{0{,}3}\right)^2 = 8{,}727 h_1^2 = \Psi h_1^2, \tag{14}$$

де $\psi = 8{,}727$ — коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення між розмірами контакт-деталі.

В цьому випадку визначення глибини проплавлення h зводиться до розв’язку трансцендентного рівняння з використанням формул (1) і (14):

$$e^{\frac{h^2}{4at_0}} = \frac{U_0 I_0 t_0 \cdot \omega}{4\sqrt{\pi a t_0 \cdot \gamma c \psi h^2 T_{\text{розр}}}}. \qquad (15)$$

Після математичних перетворень виразу (15) глибину проплавлення знаходимо за формулою

$$h^2 \cdot e^{\frac{h^2}{4at}} = \frac{U_0 I_0 \omega \cdot \sqrt{t_0}}{4\psi b T_{\text{розр}}}, \qquad (16)$$

$$\text{де} \quad b = \sqrt{\pi \lambda \gamma c} \qquad (17)$$

коефіцієнт, який визначається тільки теплофізичними характеристиками контактного матеріалу.

Коефіцієнт b для екологічно безпечних контактних матеріалів, за нашими розрахунками, становить (табл. 1)

$$b = (50—67)\cdot 10^3, \text{ Дж/м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{с}^{1/2}. \qquad (18)$$

Коефіцієнт температуропровідності для реальних контактних матеріалів (мідь, срібло, СрН-90) становить $a = (1{,}164—1{,}689)\cdot 10^{-4}$ м^2/с.

В пускачах змінного струму напругою до 1000 В час горіння електричної дуги t_0 складає не більше одного напівперіоду синусоїди, про що свідчать зняті нами осцилограми вимикання (рис. 2), а час розмикання контакт-деталей знаходиться в межах $t = 0{,}02$ с = 20 мс. Згідно з роботами [4, 5], повний час вмикання пускачів ПМЛ-1100 дорівнює $t_{1\text{повн}} = 17\pm7$ мс, а пускачів ПМЛ-2100 — $t_{2\text{повн}} = 22 \pm 5$ мс.

Глибина проплавлення, за даними випробування зразків контактних матеріалів, становить $h \approx 0{,}01—0{,}1$ мм $= (1{,}0—10)\cdot 10^{-5}$ м.

Тому, підставляючи наведені числові значення до виразу $e^{\frac{h^2}{4at_0}}$, можна обчислити величину $e^{\frac{h^2}{4at_0}}$, яка при реальних числових співвідношеннях мало відрізняється від одиниці. В подальшому глибину проплавлення однієї контакт-деталі визначають за формулою

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{U_0 I_0 \omega \sqrt{t_0}}{\psi b T_{\text{розр}}}} \qquad (19)$$

Основні теплофізичні характеристики і розрахункові температури плавлення та кипіння для серійних і дослідних контактних матеріалів, а також числові значення глибини проплавлення для різних контактних матеріалів при різних величинах струму наведено у табл. 1 та 2 [6, 7]. Математичні розрахунки проводяться з використанням програми „MathCAD 7 Professional”.

При вивченні шліфу повздовжнього перерізу електродів контактного матеріалу 83% Cu + 10% Mo + 3% MoO_3 + 3% C + 1,0% Ni під мікроскопом МИМ-7 було встановлено, що максимальна глибина проплавлення матеріалу від поверхні електроду становить 0,08 мм при параметрах $I_{\text{ном}} = 10$ А, $\tau = 40$ мс, $t_0 = 31{,}3$ мс. Різниця розрахункових ($h_1 = 7{,}673\cdot 10^{-5}$ м при $t_0 = 30$ мс) і експериментальних даних становить 4,1%.

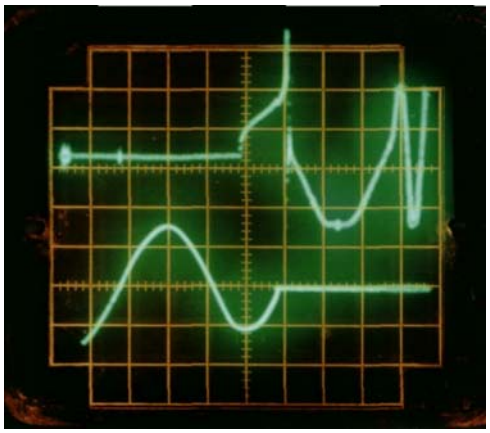


Рис. 2. Осцилограма розмикання. Параметри кола: $U = 65$ В, $I = 0$ А, $\cos\varphi = 0{,}65$ ($R = 4{,}2$ Ом, $L = 15{,}6$ мГн).

Т а б л и ц я 2. Результати розрахунків глибини зон плавлення h_1 і кипіння h_2 контакт-деталей в пускачах ПМЛ при однократній комутації струму для різних матеріалів.

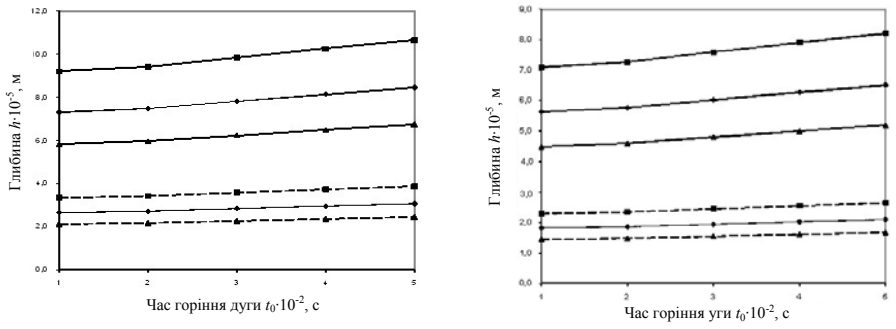
Контактний матеріал	Температура	Струм I, А	Глибини зон h_1 і h_2, $\cdot 10^{-5}$ м				
			Час горіння дуги t_0, мс				
			10	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8
Ag (100%)	T_1	4	5,545	5,678	5,930	6,181	6,415
		6,3	6,958	7,126	7,442	7,757	8,051
		10	8,767	8,977	9,376	9,773	1,014
	T_2	4	1,998	2,046	2,137	2,227	2,312
		6,3	2,513	2,573	2,687	2,801	2,907
		10	3,438	3,52	3,677	3,832	3,978
СрН-90	T_1	4	5,457	5,588	5,836	6,084	6,314
		6,3	6,849	7,013	7,324	7,635	7,924
		10	8,629	8,836	9,228	9,619	9,984
	T_2	4	1,955	2,002	2,091	2,18	2,262
		6,3	2,454	2,513	2,624	2,735	2,839
		10	3,092	3,166	3,306	3,446	3,577
СрМ-0,2 + М1	T_1	4	5,821	5,96	6,225	6,489	6,735
		6,3	7,305	7,48	7,812	8,143	8,452
		10	9,207	9,428	9,846	1,026	1,065
	T_2	4	2,113	2,164	2,26	2,355	2,445
		6,3	2,652	2,715	2,836	2,956	3,068
		10	3,341	3,421	3,573	3,724	3,866
Ag + SnO_2 + Vi + + Mn + W	T_1	4	6,149	6,296	6,576	6,854	7,114
		6,3	7,717	7,902	8,252	8,602	8,928
		10	9,722	9,956	1,040	1,084	1,125
	T_2	4	2,362	2,419	2,526	2,634	2,733
		6,3	2,965	3,036	3,171	3,305	3,430
		10	3,735	3,825	3,995	4,164	4,322
Cu (100%)	T_1	4	4,694	4,807	5,020	5,233	5,431
		6,3	5,891	6,032	6,300	6,567	6,816
		10	7,422	7,600	7,937	8,274	8,587
	T_2	4	1,788	1,831	1,913	1,994	2,069
		6,3	2,244	2,298	2,4	2,502	2,597
		10	2,828	2,896	3,024	3,152	3,272
83% Cu + + 10% Mo + + 3% MoO_3 + + 3% C + 1,0% Ni	T_1	4	4,538	4,647	4,853	5,059	5,250
		6,3	5,695	5,832	6,090	6,349	6,589
		10	7,175	7,347	7,673	7,998	8,302
	T_2	4	1,451	1,486	1,552	1,617	1,679
		6,3	1,821	1,864	1,947	2,030	2,107
		10	2,294	2,349	2,453	2,557	2,654
80,5% Cu + + 12,5% Mo + + 3% MoO_3 + + 3% C + 1,0% Ni	T_1	4	4,527	4,636	4,842	5,047	5,238
		6,3	5,682	5,818	6,076	6,334	6,574
		10	7,158	7,330	7,655	7,980	8,282
	T_2	4	1,449	1,483	1,549	1,615	1,676
		6,3	1,818	1,862	1,944	2,027	2,103
		10	2,290	2,345	2,449	2,553	2,650
78% Cu + 15% Mo + + 3% MoO_3 + + 3% C + 1,0%	T_1	4	4,487	4,595	4,799	5,002	5,192
		6,3	5,632	5,767	6,023	6,278	6,516
		10	7,095	7,266	7,588	7,909	8,209
	T_2	4	1,446	1,481	1,547	1,612	1,673
		6,3	1,815	1,859	1,941	2,024	2,100

Ni		10	2,287	2,342	2,446	2,549	2,646
86,5% Cu + + 12% Nb + + 1,0% Zr + + 0,5% Y_2O_3	T_1	4	4,588	4,698	4,907	5,115	5,309
		6,3	5,758	5,896	6,158	6,419	6,662
		10	7,254	7,429	7,758	8,087	8,394
	T_2	4	1,589	1,628	1,700	1,772	1,839
		6,3	1,995	2,043	2,133	2,224	2,308
		10	2,513	2,573	2,688	2,801	2,908
83,5% Cu + + 15% Nb + + 1,0% Zr + + 0,5% Y_2O_3	T_1	4	4,572	4,681	4,889	5,096	5,289
		6,3	5,737	5,875	6,136	6,396	6,638
		10	7,228	7,402	7,730	8,058	8,363
	T_2	4	1,589	1,627	1,700	1,772	1,839
		6,3	1,994	2,042	2,133	2,223	2,308
		10	2,513	2,573	2,687	2,801	2,907
86,3% Cu + + 5,0% Cr + + 3,0% TiB_2 + + 3,0% Nb + + 2,0% C + + 0,7% Zr	T_1	4	4,538	4,647	4,853	5,058	5,250
		6,3	5,695	5,831	6,090	6,348	6,589
		10	7,174	7,347	7,673	7,998	8,301
	T_2	4	1,517	1,553	1,622	1,691	1,755
		6,3	1,904	1,950	2,036	2,122	2,203
		10	2,399	2,456	2,565	2,674	2,775
83,8% Cu + + 7,5% Cr + + 3,0% TiB_2 + + 3,0% Nb + + 2,0% C + + 0,7% Zr	T_1	4	4,532	4,641	4,846	5,052	5,243
		6,3	5,687	5,824	6,082	6,340	6,580
		10	7,165	7,337	7,663	7,988	8,290
	T_2	4	1,524	1,560	1,629	1,698	1,763
		6,3	1,912	1,958	2,045	2,131	2,212
		10	2,409	2,467	2,576	2,685	2,787
81,3% Cu + + 10% Cr + + 3,0% TiB_2 + + 3,0% Nb + + 2,0% C + + 0,7% Zr	T_1	4	4,526	4,635	4,840	5,045	5,237
		6,3	5,680	5,816	6,074	6,332	6,572
		10	7,156	7,328	7,653	7,978	8,280
	T_2	4	1,530	1,567	1,636	1,706	1,770
		6,3	1,920	1,966	2,053	2,141	2,222
		10	2,419	2,477	2,587	2,697	2,799

Незважаючи на те, що розрахунок теплового режиму електродів зроблено один раз, співпадання результатів розрахунку з експериментальними даними задовільне.

На рис. 3 наведено графіки залежності глибини проплавлення контакт-деталі пускача від часу горіння дуги для двох контактних матеріалів при різному робочому струмі.

В той же час потрібно врахувати, що розрахунок здійснений для матеріалу, який має гетерогенну структуру. При використанні електродів з гомогенною структурою залежність може змінюватися, тому при розрахунках потрібно робити акцент на факторі гетерогенності.



а *б*

Рис. 3. Глибина проплавлення контакт-деталі пускача з матеріалів СрМ-0,2 + + М1 (*а*) та 78% Cu + 15% Mo + 3% MoO_3 + 3% C + 1,0% Ni (*б*) при різних струмах: - -▲- - — 4 А, *h*2; —▲— — 4 А, *h*1; - - ♦ - - — 6,3 А, *h*2; —♦— — 6,3 А, *h*1; - - ■ - - — 10 А, *h*2; —■— — 10 А, *h*1; *h*1, *h*2 — глибина зон плавлення та кипіння відповідно.

Висновки

При деяких припущеннях тепловиділення в процесі комутації електричного струму в пускачах результати розрахунку теплового режиму електродів та глибини проплавлення досить гарно співпадають з експериментальними даними (відрізняються на 4—5%).

Глибина проплавлення визначається теплофізичними характеристиками контактного матеріалу, розрахунковими температурами розплавлення, кипіння та випаровування контактного матеріалу.

Глибина проплавлення прямо пропорційна величині комутованого струму 4; 6,3 та 10 А.

Одержану методику можна рекомендувати для застосування в подальших розрахунках ерозії та терміну служби контактів.

1. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. — М.: ГИТЛ, 1967. — 303 с.
2. *Томан А. С., Сагач М. Ф., Кохановский С. П.* Электроэнергетические показатели разрывных контактов // Электрификация сельскохозяйственного производства. Научн. труды УСХА. — К.: Изд-во УСХА. — 1975. — Вып. 110, том II. — С. 61—71.
3. *Jones F. L.* The Physics of Electrical contacts. — Oxford: Clarendon Press, 1957. — 323 p.
4. *Каталог 07.14.01-82.* Пускатели электромагнитные серии ПМЛ. — М.: Информэлектро, 1982.
5. *ГОСТ 2491-82 (СТ СЭВ 5535-86).* Пускатели электромагнитные низковольтные: Общие технические условия. — Введ. 01.01.83. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 22 с.
6. *Справочник по электротехническим материалам* / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — Т. 3. — 728 с.
7. *Хольм Р.* Электрические контакты. — М.: Изд-во ИЛ, 1961. — 464 с.