

1970

Nr 52

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA — MIEDZESZYN

PROBLEMY
ŁĄCZNOŚCI

WISŁOŃ
Instytut Łączności



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

ROK 10

WARSZAWA 1970

NR 52

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja
Problemów Łączności i Przeglądu Zagadnień Łączności

Redaktor Naczelny - prof. Zenon Szpigler

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner. mgr inż. Adam Moniuszko,
mgr inż. Józef Możejko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Egz. Nr

31

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 755. Druk ukończono
w październiku 1970 r.

PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI

UKŁADY GASIKOWE W OBWODACH PRZEKAŹNIKÓW TELEFONICZNYCH

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Zjawiska towarzyszące erozji elektrotermicznej oraz warunki ich powstawania	4
2.1. Uwagi ogólne	4
2.2. Opis podstawowych wyładowań elektrycznych w stałej szczelinie	6
2.3. Zjawiska zachodzące przy otwieraniu zestyku	12
2.4. Zjawiska zachodzące przy zamykaniu zestyku	33
2.5. Wpływ niektórych czynników i warunków pracy na przebieg wyładowań i trwałość styczek	35
3. Skutki stanu nie ustalonego podczas przełączania zestyków	38
4. Układy zabezpieczające przed nadmierną erozją	41
4.1. Uwagi ogólne	41
4.2. Układ gaszący kondensatorowo-rezystorowy	46
4.3. Układ gaszący rezystorowy, linearny	65

	Str.
4.4. Układ gaszący rezystorowy, nieliniarny, symetryczny (warystor)	67
4.5. Układ gaszący rezystorowy, nieliniarny, niesymetryczny (dioda, prostownik metalowy)	70
4.6. Odmiány układów podstawowych oraz układy gaszące kombinowane	72
4.7. Konstrukcja elementów układów gasikowych	74
4.8. Porównanie podstawowych układów gasikowych	77
Wykaz literatury	83

Janusz Wolniewicz

UKŁADY GASIKOWE W OBWODACH PRZEKAŹNIKÓW TELEFONICZNYCH

WSTĘP

Znaczny i stale potęgujący się wzrost liczby oraz rozbudowa istniejących central telefonicznych, coraz większa gęstość rozmów telefonicznych i coraz dalszy zasięg połączeń w sieciach okręgowych, krajowych i międzynarodowych, a także szybko wzrastająca automatyzacja łącznych, a także szybko wzrastająca automatyzacja łącznych, nie wymagają w procesach łączenia coraz większej liczby zestyków, w wyniku czego wzrasta także znaczenie zwiększenia pewności działania układów stykowych. Masowe występowanie zestyków w urządzeniach teletechnicznych sprawia z kolei, że podstawowe zagadnienie teletechniki łączeniowej stanowią obecnie niezawodność i trwałość układów stykowych, przy czym coraz szersze stosowanie elementów półprzewodnikowych i światowe tendencje do przechodzenia na półelektroniczne systemy central telefonicznych nie zmniejszają znaczenia powszechnie do tej pory stosowanych zestyków elektromechanicznych. Znacznie większy współczynnik komutacji (stosunek oporu zestyku w stanie przewodzenia do jego oporu w stanie nieprzewodzenia) i duża wrażliwość na przeciążenia oraz na zakłócenia zewnętrzne elementów półprzewodnikowych powodują bowiem, że w dalszym ciągu w produkowanych urządzeniach telekomutacyjnych wykorzystuje się układy sty-

kowo-przełącznikowe, a istniejące w niektórych przodujących krajach kapitalistycznych nieliczne centrale całkowicie elektroniczne są właściwie dotąd obiektami eksperymentalnymi, wobec czego nie należy się spodziewać, aby w najbliższym dwudziestoleciu zestyk elektromechaniczny, przynajmniej u nas w kraju, utracił swe podstawowe znaczenie. W tej sytuacji ogólne tendencje idą w kierunku zmniejszenia wymiarów układów stykowo-przełącznikowych oraz przede wszystkim w kierunku zwiększenia ich niezawodności i trwałości przez powszechne stosowanie przełączników z zestykami hermetycznymi, co eliminuje szkodliwy wpływ czynników zewnętrznych (pył, pary organiczne oraz inne agresywne czynniki atmosfery otoczenia), a także przez stosowanie odpowiednich do zadań zestyku materiałów stykowych i zabezpieczeń elektrycznych zestyków, zwanych gasikami.

Czynnikiem decydującym o trwałości zestyków jest szybkość zużywania się materiału stykowego, spowodowanego zużywaniem się mechanicznym (erozją mechaniczną), chemicznym (korozją) i elektrycznym (erozją elektrotermiczną).

Erozja mechaniczna występuje bez udziału przepływającego przez zestyk prądu elektrycznego i jest wynikiem działania nacisku stykowego, energii kinetycznej zderzeń styeczek oraz tarcia. Powoduje ona odkształcenia mechaniczne, rozklepywanie materiału styeczek i jego rozwarstwienie powierzchniowe.

Korozja może występować na elementach stykowych zarówno bez udziału przepływającego prądu, jak też przy

przepływie prądu przez elementy stykowe pozostające w spoczynku w stanie zetkniętym, przy czym, zależnie od materiału stykowego i warunków otoczenia, może nastąpić utlenienie materiału lub inna reakcja chemiczna z wytworzeniem się na nim różnych związków chemicznych. W wyniku powyższego zmniejsza się powierzchnia stykowa oraz wytwarzają się produkty korozji na elementach stykowych, powodując nadmierny wzrost oporu stykowego, a w przypadku utworzenia się związków kruchych - łuszczenie i odpadanie ich od elementów stykowych, czyli stopniowy ubytek materiału stykowego.

Erozja elektrotermiczna spowodowana jest różnego rodzaju wyładowaniami elektrycznymi, przebiegającymi między elementami stykowymi podczas otwierania i zamykania obwodu elektrycznego, których charakter i intensywność zależą od parametrów tego obwodu, oraz związanymi z nimi zjawiskami cieplnymi, wywołanymi przepływem prądu elektrycznego. W wyniku powyższego występuje topnienie, parowanie i rozpylanie materiału, powodujące ubytek materiału stykowego jednego elementu, kosztem którego przybiera materiał na drugim elemencie (przenoszenie materiału stykowego), lub nawet ubytek z obydwu elementów stykowych. Wysoką temperaturą towarzyszącą tym zjawiskom powoduje także częściowo korozję materiału stykowego w wyniku utleniania oraz innych reakcji z otoczeniem przebiegających przy wysokich temperaturach.

W normalnych warunkach otoczenia i pracy zestyków, największy wpływ na zużycie ich styczek ma erozja elektrotermiczna. Celem niniejszego artykułu jest właśnie o-

mówienie sposobów zabezpieczania stycek przekaźników przed tym rodzajem erozji za pomocą układów gaszących i dlatego też najpierw szczegółowo zostaną opisane zjawiska jej towarzyszące.

2. ZJAWISKA TOWARZYSZĄCE EROZJI ELEKTROTERMICZNEJ ORAZ WARUNKI ICH POWSTAWANIA

2.1. Uwagi ogólne

Podczas zamykania i otwierania zestyków komutujących obwody elektryczne, a więc w okresie trwania stanu nie ustalonego, na elementach stykowych zachodzą różne zjawiska, których rodzaj i natężenie zależą głównie od parametrów elektrycznych komutowanych obwodów, czyli od napięcia, prądu i rodzaju obciążenia elektrycznego. Zjawiska te nieco różnią się między sobą przy zamykaniu i otwieraniu obwodów oraz mają zasadniczy wpływ na wielkość, rodzaj i kierunek erozji, przy czym można wśród nich rozróżnić następujące zjawiska:

- tworzenie się mostków (tzw. erozja mostkowa),
- łuki (krótkie i tzw. plazmowe),
- wyładowania przejściowe (iskrzyenie),
- wyładowania świetlące.

Oznaczając przez I_0 i U_0 minimalne wartości prądu i napięcia, przy których mogą już tworzyć się mostki, przez I_m i U_m minimalne wartości prądu i napięcia niezbędne dla powstania łuku oraz przez U_z minimalne napięcie niezbędne do zainicjowania wyładowania świetlącego, w okre-

sie nie ustalonym otwierania zestyku występuje według Sotskowa i in. następujący podział obszaru erozji [33]:

- przy bardzo małych prądach ($I < I_0$) oraz napięciach mniejszych niż U_z ($U < U_z$) nie ma erozji elektrotermicznej,
- przy prądzie $I < I_0$ i napięciu $U > U_z$ powstaje wyładowanie świetlące, które powoduje erozję styczki ujemnej,
- jeżeli $I_0 < I < I_m$ i $U < U_m$, powstają tylko płynne mostki metaliczne, które powodują erozję styczki dodatniej,
- jeśli $I_0 < I < I_m$ i $U_m < U < U_z$, powstają początkowo płynne mostki metaliczne, a potem krótkie łuki, które powodują również erozję styczki dodatniej,
- przy $I_0 < I < I_m$ i $U > U_z$ powstają początkowo płynne mostki metaliczne z towarzyszącą im erozją styczki dodatniej, a następnie wyładowania świetlące o przeciwnym kierunku erozji,
- wreszcie przy $I > I_m$ i $U > U_m$ powstają początkowo płynne mostki metaliczne (erozja styczki dodatniej), a po ich przerwaniu się łuk plazmowy z towarzyszącą mu erozją styczki ujemnej.

Charakterystykę napięciowo-prądową z zakreślonymi obszarami erozji zgodnie z powyższym podziałem przedstawiono na rys. 1^{x)}. Wartości prądów i napięć granicznych

^{x)} Wszystkie rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

zależą od materiału styków i otaczającego środowiska.

Jeśli prąd w obwodzie zestyku jest za mały do zainicjowania lub podtrzymania łuku, lecz w obciążeniu jest indukcyjność i pojemność, podczas otwierania zestyku występują wtedy wyładowania przejściowe.

2.2. Opis podstawowych wyładowań elektrycznych w stałej szczelinie [15,26]

Rozróżnia się dwa główne rodzaje samopodtrzymujących się wyładowań: wyładowanie świetlące i łuk [15]. Wyładowanie świetlące charakteryzuje się spadkiem katodowym rzędu kilkuset woltów, umiarkowaną temperaturą katody i względnie małą gęstością prądu, a łuk ma spadek katodowy rzędu 10 V, bardzo wysoką temperaturę katody i bardzo dużą gęstość prądu przy katodzie.

Różnicę określa rodzaj emisji elektronów pierwotnych z katody.

Wyładowania świetlące

Zapoczątkowanie wyładowań świetlących w stałej szczelinie jest związane tzw. przebicciem elektrycznym gazu (powietrza), przy czym proces ten przebiega jak niżej.

W chwili $t = 0$ w szczelinie o długości s istnieje spadek napięcia V . Temperatura katody jest w tym momencie za niska do spowodowania emisji elektronów, która jest wywoływana głównie efektem Augera, polegającym na wyzwolaniu się energii przez rekombinację jonów z elektronami przy powierzchni katody, co powoduje uwolnienie

wtórnego elektronu z katody. Jednak pierwotny elektron musi wytworzyć wiele jonów, aby spowodować uwolnienie pojedynczego wtórnego elektronu z katody i tym też tłumaczy się konieczność dużego spadku katodowego w wyładowaniu świetlącym. W ten sposób uwolnione elektrony zapoczątkowują lawinę, przebiegającą w kierunku anody i pozostawiają za sobą powolne jony dodatnie, których ładunek przestrzenny podwyższa natężenie pola po ich stronie katodowej, przy czym wytworzone jony wędrują stosunkowo wolno (10^5 cm/s) dalej do katody, gdzie wyzwalają nowe elektrony, tworząc zarodek kolejnej lawiny. Tymczasem nowe elektrony, które zostały wytworzone w pierwszej lawinie, wytwarzają wtórną lawinę elektronów, przebiegających teraz w silniejszym polu niż pierwsze i dlatego też bardziej skutecznych. W ten sposób szybko formujące się wyładowanie świetlące jest zakończone i może przejść w łuk w przypadku dostatecznie dużego prądu. Do przebiegu tego procesu wymagane jest, aby napięcie V było większe niż napięcie poświaty ujemnej katody (w przypadku powietrza $V \text{ min } \approx 300 \text{ V}$) oraz żeby w szczelinie s była dostateczna ilość cząsteczek gazu do utworzenia lawin.

Napięcie przebicia V_p jest funkcją rodzaju gazu i iloczynu $d \cdot s$, gdzie d jest gęstością gazu, a s długością szczeliny (prawo Paschena). W temperaturze pokojowej iloczyn $d \cdot s$ może być zastąpiony iloczynem $p \cdot s$, w którym s wyraża się w cm, a p (ciśnienie gazu) w torach lub atmosferach.

Funkcję $V_p = f(p \cdot s)$ dla powietrza przedstawiono na rys. 2, na którym funkcja ma minimum przy $V_p = 330 \text{ V}$ i

$p_s = 7 \cdot 10^{-4}$ atm.cm. Dokładniejsze badania wykazały jednak, że w przypadku szczelin mniejszych niż 1000 Å zapłon występuje przy napięciu mniejszym niż 330 V, a mianowicie nawet przy 50 V, przy czym stwierdzono, że przyczyną tego może być między innymi aktywacja styczek, powodowana głównie wpływem par substancji organicznych.

Podczas przerywania obwodu elektrycznego zasilanego źródłem prądu stałego o napięciu około 300 V wyładowanie świetlące powodują nawet bardzo małe prądy, a zainicjowane wyładowanie świetlące może trwać nadal mimo zwiększenia odległości elektrod. Napięcie wyładowania jest około 20 V mniejsze niż napięcie zapłonu i niewiele większe niż napięcie gaśnięcia, przy czym minimalne napięcia zapłonu w powietrzu wynoszą dla Cu-280 V, Ni-275 V, Pt-300 V, Ag-300 i W-325 V. Napięcie wyładowania świetlącego praktycznie nie zmienia się przy wzroście prądu od około 10^{-4} A do 10^{-1} A, podczas gdy przy dalszym wzroście prądu następuje nagłe zwiększenie napięcia w szczelinie, a potem gwałtowny jego spadek do wartości około 10-15 V, gdy wyładowanie świetlące przechodzi w wyładowanie łukowe. Podczas wyładowania świetlącego pewna część energii kinetycznej jonów uderzających w katodę powoduje erozję katody w postaci rozpylania jej materiału.

Łuk stacjonarny

Podstawą wyładowania łukowego jest wysoka temperatura katody. W przypadku trudno topliwych materiałów, katoda pozostaje w czasie tego wyładowania w stanie sta-

łym, podczas gdy w przypadku katod łatwo topliwych temperatura ich wzrasta powyżej temperatury wrzenia. Aby wrzenie było podtrzymywane, dostarczana energia musi być dostatecznie duża, co jest możliwe, gdy plazma katodowa (część powierzchni katody biorąca aktywny udział w procesie) jest mała, czyli gęstość prądu duża.

Rozróżnia się trzy strefy łuku; a mianowicie strefę katodową, identyczną z obszarem spadku katodowego, oraz strefę anodową i plazmę. Jak już wspomniano w 2.1 oraz jak wykazały badania, do zapłonu łuku w szczelinie niezbędne są pewne minimalne napięcie V_m i prąd I_m , z którymi łączy się pojęcie najkrótszego łuku, przy czym I_m i V_m zależą od materiału katody, a I_m dodatkowo również od kształtu stycek. Poniżej zaś tych wartości łuk nie powstaje nawet przy nieskończonej małym rozwarciu stycek. Stwierdzono również, że przy danej długości łuku (szerokości szczeliny) utrzymanie jego wymaga tym większego napięcia, im mniejszy jest prąd, w związku z czym opracowano charakterystyki napięciowo-prądowe, w których napięcie V łuku podano w funkcji prądu dla określonej długości łuku. Linie $I = I_m$ i $V = V_m$ są asymptotami tych charakterystyk, przy czym asymptota $I = I_m$ jest wspólna dla rodziny charakterystyk danego metalu, różniących się długością łuku s , podczas gdy charakterystyka $V = V_m$ jest asymptotą wyznaczającą najkrótszy łuk ($s = 0$).

Przykład rodziny charakterystyk dla złota przedstawiono na rys. 3, na którym asymptota $V = V_m$ jest wyraźnie określona, a asymptota $I = I_m$ nie zaznaczona, po-

nieważ jest ona zależna od wielu czynników, z których nie wszystkie zostały skontrolowane. I tak stwierdzono m.in., że I_m zależy od wilgotności względnej powietrza (wydaje się mieć minimum przy wilgotności 50% i przybie-
ra często wartości nawet o 50% większe przy bardzo ma-
łych lub bardzo dużych wilgotnościach) i stanu elektrod. W tabelicy 1 przedstawiono wartości I_m i V_m dla różnych metali w normalnej atmosferze, podane przez różnych ba-
daczy [15], a na rys. 3 wykreślono proste odpowiadające stałym rezystancjom R , nazywane liniami rezystancji, które są bardzo przydatne przy wykonywaniu obliczeń z wykresu.

T a b l i c a 1

Minimalny prąd i minimalne napięcie dla zapłonu łuku

Mate- rial	I_m (A)			V_m (V)			
	Ives	Fink	Holm	Ives	Gaul- ropp	Fink	Holm
Ni		0,2	0,5			8,0	14
Cu		1,15	0,43		12,5	8,5	13
Ag		0,9	0,4		12,3	8	12
W	1,75	1,27	1,0-1,1		15,2	10	15
Pt	0,67	1,0	0,7-1,1	15	15,3	13,5	17,5
Au	0,38	0,42	0,38	11,5	12,6	9,5	15

Charakterystyki te mogą być zastosowane, na przykład, do określenia czasu trwania łuku. I tak założmy, że obwód składa się z baterii o SEM $E = 60$ V, rezystancji R

i zestyku ze złota połączonych w szereg, oraz że, przy zamkniętym zestyku prąd $I_k = 2$ A. Zestyk ten jest otwierany ze stałą prędkością V cm/s, mniejszą niż 20 cm/s, gdyż przy większej prędkości stany łuku różniłyby się od stanów równowagi. Między punktem $E = 60$ V na osi rzędnych i punktem I_k na osi odciętych wykreśla się prostą rezystancji, której nachylenie odpowiada $R = 60/2 = 30 \Omega$, a ponieważ prosta ta przecina charakterystykę najkrótszego łuku przy $I = 1,5$ A, można wnioskować, że łuk zapala się przy tym właśnie prądzie i napięciu. Natomiast charakterystyka, która jest styczna do linii rezystancji (w danym przykładzie odpowiednio $S_2 = 0,37$ mm, $I \approx 0,65$ A), dotyczy największej długości łuku $S = S_2$, która jest osiągalna przez tę linię rezystancji. Wobec tego czas trwania łuku wynosi $t = S_2/V$, a przy większej szczelinie łuk przerywa się. Obliczenia takie są słuszne, gdy obwód jest rzeczywisty, $E < 250$ V, atmosfera jest niezmienna, podobnie jak i prędkość otwierania styku, oraz gdy łuk jest w stanie równowagi.

Każda rodzina charakterystyk tego rodzaju jest więc słuszna tylko dla określonego metalu oraz określonej zawartości wilgoci w powietrzu i jeśli chcemy użyć metody linii rezystancji dla różnych metali i atmosfer, trzeba do tego mieć duży zbiór charakterystyk. Można jednak tego uniknąć, stosując uproszczoną metodę, która umożliwia korzystanie z wykresów dla normalnej atmosfery (wilgotności 50%) za pomocą jednej rodziny charakterystyk. I tak stwierdzono, że po nałożeniu na siebie rodzin charakterystyk różnych metali (wykreślonych w tej samej

skali) w taki sposób, aby ich asymptoty $I = I_m$ i $V = V_m$ pokrywały się, charakterystyki metali o danej długości łuku S praktycznie także pokrywają się. Prawo to jest tak ogólne, że jedna rodzina charakterystyk może być użyta dla różnych metali i wilgotności pod warunkiem poprawnego położenia asymptot.

Jak już wspomniano w 2.1, rozróżnia się dwa rodzaje łuków, a mianowicie krótki łuk i tzw. łuk plazmowy. Według Pommeringa [27] krótki łuk powstaje wtedy, gdy odległość między elementami stykowymi w chwili osiągnięcia napięcia łuku jest tak mała, że anoda znajduje się w obszarze spadku potencjału katody; anoda odparowuje wtedy bardziej, a przenoszenie materiału zachodzi od anody do katody. Natomiast łuk plazmowy powstaje wtedy, gdy odległość między elementami stykowymi jest tak duża, że anoda jest poza obszarem spadku katodowego; katoda odparowuje wtedy bardziej niż anoda i przenoszenie materiału zachodzi od katody do anody.

2.3. Zjawiska zachodzące przy otwieraniu zestyku

2.3.1. Bilans energii obwodu zawierającego indukcyjność [4,28,34]

Obwody interesujące nas z punktu widzenia późniejszych rozważań, dotyczących układów gaszących będą z zasady zawierały przekaźnik lub elektromagnes, w którego materiale (rdzeń stalowy) po przyciągnięciu kotwicy i ustaleniu się prądu, występuje zwykle stan nasycenia, co

powoduje zmienność indukcyjności cewki w przebiegu nie ustalonym przerywania obwodu. Obwody takie mogą być przełączane zestykami hermetycznymi lub zestykami innych, zwykłych przekaźników, przy czym w dalszych rozważaniach, w celu wyeliminowania różnych niekontrolowanych wpływów otoczenia, przyjęto, że zestykiem sterującym jest zestyk hermetyczny. Również niżej będzie rozpatrzony najpierw obwód z obciążeniem w postaci cewki o stałej indukcyjności (cewka powietrzna), a dopiero potem obwód z przekaźnikiem.

Obwód z cewką powietrzną [4]

Równanie tego obwodu (rys. 4) w stanie nie ustalonym, gdy nastąpi zapłon wyładowania świetlącego, ma postać równania różniczkowego [28]:

$$U_B = iR + L \frac{di}{dt} + U_S \quad (1)$$

w którym

U_B - napięcie baterii,

R - rezystancja cewki,

L - indukcyjność cewki,

U_S - napięcie zapłonu wyładowania świetlącego.

Według K.L. Rau'a [28] trwałość styczek przy obciążeniu indukcyjnym zależy od energii wydzielonej w szczelinie stykowej podczas otwierania zestyku, którą otrzymuje się, mnożąc obydwie strony równania (1) przez idt oraz całkując w okresie czasu T trwania wyładowania świetlącego:

$$\int_0^T U_s i dt = \int_0^T (U_B - iR) i dt - \int_I^0 L i di \quad (2)$$

Oznaczając przez I wartość prądu ustalonego, po scałkowaniu ostatniego członu równania (2) w podanych granicach, otrzymuje się z kolei

$$- \int_I^0 L i di = \frac{1}{2} LI^2$$

wobec czego

$$\int_0^T U_s i dt = \int_0^T U_B i dt - \int_0^T i^2 R dt + \frac{1}{2} LI^2 \quad (3)$$

przy czym poszczególne człony oznaczają:

$\int_0^T U_s i dt$ - energię wydzieloną w szczelinie podczas wyładowania świetlającego,

$\int_0^T U_B i dt$ - energię dostarczoną do obwodu przez źródło prądu stałego podczas trwania wyładowania,

$\int_0^T i^2 R dt$ - energię wydzieloną w oporniku podczas trwania wyładowania,

$\frac{1}{2} LI^2$ - energię pola magnetycznego.

Po przeprowadzeniu pewnych uproszczeń i przyjęciu założeń właściwych dla urządzeń telekomutacyjnych, w których U_B nie przekracza 60 V przy U_s wynoszącym co najmniej 220 V, wartość różnicy drugiego i trzeciego członu prawej strony równania (3) można pominąć, w wyniku czego otrzymuje się:

$$\int_0^T U_s i dt \approx \frac{1}{2} LI^2 \quad (4)$$

co oznacza, że energia wydzielona w szczelinie stykowej podczas wyładowania świetlącego przy rozwieraniu obwodu zawierającego stałą indukcyjność jest praktycznie równa energii pola magnetycznego. Energia ta będzie nazywana dalej energią rozłączania zestyku.

Próby trwałości, przeprowadzone m.in. przez A. Piątkowskiego [26], potwierdziły wyniki doświadczeń K.L. Rau'a [28], z których wynika, że trwałość stycek jest proporcjonalna do energii rozłączania zestyku.

Obwód z przekaźnikiem [4]

Ponieważ w tym przypadku indukcyjność cewki zmienia się znacznie w funkcji wzbudzenia, bardziej celowe jest wprowadzenie w nim do obliczeń napięcia indukowanego przez pole magnetyczne, z pominięciem samego parametru indukcyjności. Należy również wziąć pod uwagę, że istnienie materiału magnetycznego w obwodzie powoduje, iż w stanie nie ustalonym obwodu występują zjawiska histerezy i prądów wirowych.

Obwód z przekąźnikiem, w postaci układu zastępczego, przedstawiono na rys. 5. Przyjmując obwód zawierający zestyk hermetyczny za obwód pierwotny, a obwód prądów wirowych za wtórny, przebieg nie ustalony przy rozłączeniu takiego obwodu można scharakteryzować następującym układem równań:

$$i' = i_1 + i_2 \quad (5)$$

$$U_B = i_1 R_1 + w \frac{d\phi}{dt} + U_s \quad (6)$$

$$0 = i_2 R_2 + w \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

w których pominięto strumień rozproszenia, co oznacza, że strumień ϕ jest wytworzony przez prąd i' .

Analogicznie jak przy cewce powietrznej interesuje w tym przypadku także energia wydzielona w szczelinie, pochodząca od wyładowania świetlącego, którą otrzymuje się mnożąc równanie (6) przez $i_1 dt$, a równanie (7) przez $i_2 dt$, całkując następnie w czasie trwania wyładowania świetlącego T_1 i dodając potem obydwie równania stronami:

$$\int_0^{T_1} U_s i_1 dt = \int_0^{T_1} (U_B - i_1 R_1) i_1 dt + w \int_{\phi_1}^{\phi_0} i' d\phi - \int_0^{T_1} i_2^2 R_2 dt \quad (8)$$

przy czym

ϕ_0 jest stacjonarną wartością strumienia w chwili $t = 0$,

ϕ_1 jest wartością strumienia w momencie $t = T_1$ zaniku (wygaszania) wyładowania świetlącego,

$w \cdot \int_{\phi_1}^{\phi_0} i' d\phi$ odpowiada zmagazynowanej energii podczas wyładowania świetlącego.

$\int_0^{T_1} i_2^2 R_2 dt$ odpowiada powstałym w tym samym czasie stratom na prądy wirowe.

Wprowadzając do równania (8) całkowitą wartość energii magnetycznej zmagazynowanej w stanie stacjonarnym, którą przy pominięciu strat na histerezę można wyrazić jako

$$w \cdot \int_0^{\phi_0} i' d\phi = w \cdot \int_0^{\phi_1} i' d\phi + w \cdot \int_{\phi_1}^{\phi_0} i' d\phi \quad (9)$$

otrzymuje się z kolei

$$\int_0^{T_1} U_S i_1 dt = \int_0^{T_1} (U_B - i_1 R_1) i_1 dt + w \cdot \int_0^{\phi_0} i' d\phi - w \int_0^{\phi_1} i' d\phi - \int_0^{T_1} i_2^2 R_2 dt \quad (10)$$

przy czym taki bilans energii, w przypadku przerywania obwodu zawierającego przełącznik płaski typu 48, L. Borchert i K. L. Rau [4] przedstawili w postaci tablicy 2.

Z tablicy tej widać, że wartość energii rozłączania zestyku jest stosunkowo mała w porównaniu z całkowitą energią magnetyczną.

Bilans energii rozłączania obwodu z przekąźnikiem płaskim typu 48

Energia dostarczona		Energia zużyta	
$W = \int_0^{\phi_0} i' d\phi$	$\int_0^{T_1} (U_B - i_1 R_1) i_1 dt$ <p>Całkowita energia magnetyczna zgromadzona w cewce przekąźnika w stanie stacjonarnym</p>	$\int_0^{T_1} i_2^2 R_2 dt$	Straty na prądy wirowe w przekąźniku podczas wyładowania świetlającego
		$\int_0^{T_1} U_s i_1 dt$	Energia wydzielona podczas wyładowania świetlającego, odpowiadająca energii rozłączania ze styku
		$W = \int_0^{\phi_1} i' d\phi$	Energia pozostałości magnetycznej. Przemiana w straty na prądy wirowe po wygaśnięciu wyładowania świetlającego
<p>Dane przekąźnika:</p> <p>liczba zwojów $w = 14000$</p> <p>opór $R_1 = 2000 \Omega$</p> <p>średnica drutu $0,12 \text{ mm}$</p> <p>szkock $1,3 \text{ mm}$</p> <p>przekładka antymagnetyczna $0,1 \text{ mm}$</p> <p>napięcie baterii $U_B = 60 \text{ V}$</p> <p>prąd ustalony $I = 30 \text{ mA}$</p> <p>(3,5-krotny współczynnik bezpieczeństwa)</p>			

$4 \cdot 10^4$
erg

Energia

Badania trwałości zestyków obciążonych cewką zawierającą rdzeń stalowy wykazały, że trwałość styków także w tym przypadku jest jednoznacznie określona przez energię rozłączania i prąd obwodu, jakkolwiek, przeciwnie do cewki powietrznej, energia przełączania nie może być obliczona z elementarnych parametrów obwodu obciążenia.

Przez analogię z cewką powietrzną można jednak również operować i w tym przypadku stałą, tzw. czynną indukcyjnością rozłączania L_1 , która będzie odpowiadać stałej indukcyjności takiej cewki powietrznej, która przy tym samym prądzie stacjonarnym powoduje wydzielanie w otwierającym się zestyku takiej samej energii rozłączania i w związku z tym prowadzi do takiej samej trwałości zestyku. Tak więc można napisać, że

$$\int_0^{T_1} U_s i_1 dt = \frac{1}{2} L_1 I^2 \quad (11)$$

Pojęciem indukcyjności rozłączania przekaźnika można jednak operować tylko z punktu widzenia trwałości styków lub wydzielanej przy ich rozdzielaniu się energii. Indukcyjność tę oblicza się z równania (11)

$$L_1 = \frac{2 \cdot \int_0^{T_1} U_s i_1 dt}{I^2}, \quad (12)$$

przy czym dla większości zastosowań dostateczne jest przybliżenie

$$L_1 \approx 0,7 \frac{T_1}{I} U_s \quad (13)$$

Podsumowując powyższe rozważania bilansu energii w stanie nie ustalonym obwodu zawierającego cewkę powietrzną lub przekaźnik, K. Borchert i K.L. Rau stwierdzają co następuje:

a. Energia rozłączania

W przypadku cewki powietrznej energia rozłączania jest praktycznie identyczna z energią pola magnetycznego zmagazynowanego w cewce.

Natomiast w przypadku przekaźnika energia rozłączania jest tylko ułamkiem całkowitej energii zmagazynowanej w jego cewce, gdyż pozostała część energii przemienia się w straty na prądy wirowe częściowo podczas wygaszenia i częściowo po wygaszeniu wyładowania Świetlącego. Przeciwnie do cewki powietrznej, w końcowej fazie wyładowania w szczelinie istnieje w cewce jeszcze znaczny strumień magnetyczny, który jest tak duży, że do tego momentu kotwica przekaźnika jest w stanie przyciągniętym. Tak więc przebieg rozłączania jest identyczny przy dociśniętej mechanicznie kotwicy przekaźnika z przebiegiem przy kotwicy mającej swobodę ruchu.

b. Trwałość styczek

Trwałość styczek jest określona przede wszystkim przez energię rozłączania, która wydziela się przy rozdzielaniu się styczek w szczelinie powstałej podczas wyładowania Świetlącego. Badania wykazały, że zużycie sty-

czek zwiększa się ze wzrostem energii rozłączania oraz że krzywe jednakowej energii rozłączania są w pierwszym przybliżeniu krzywymi jednakowej trwałości dla danego rodzaju zestyku, przy czym jest obojętne, czy energia ta pochodzi z cewki powietrznej czy też z cewki zawierającej rdzeń stalowy, a więc z przekaźnika. Tak więc dla zgrubnej orientacji wystarcza podanie samej energii rozłączania jako parametru określonej trwałości, z czego wynika możliwość ekstrapolacji wyników na inne przypadki obciążeń z samej tylko próby trwałości (przy pewnym średnim obciążeniu), jeżeli znana jest energia rozłączania.

Rozważania powyższe L. Borchert i K.L. Rau [4] oparli na dwóch decydujących uproszczeniach dla określonych rodzajów zestyków i obciążeń, występujących w telekomunikacji, według których:

1) trwałość styczek zależy przede wszystkim od przebiegu ich rozłączania, podczas gdy zamykanie styczek ma tylko uboczne znaczenie;

2) niszczenie styczek podczas przebiegu rozłączania powodowane jest prawie wyłącznie wyładowaniem świetlącym.

Obydwa założenia sprawdzają się dostatecznie według autorów dla wielu różnych zestyków używanych w telekomunikacji, pracujących zarówno w otoczeniu powietrza, jak i gazu obojętnego. Założenia te nie są słuszne tylko dla zestyków próżniowych lub rtęciowych, pracujących przy

bardzo małych lub bardzo dużych ciśnieniach, oraz dla zestyków charakteryzujących się znacznymi drganiami.

W celu poglądowego przedstawienia wielkości charakterystycznych występujących w telekomutacji podano na rys. 6 wyniki badań [4] przekaźników i elektromagnesów o danych zestawionych w tabl. 3. Badania przy użyciu przekaźników (mających cztery zestyki zwierne) jako obciążenia zestyku hermetycznego były przeprowadzone przy prądach odpowiadających 1-, 1,5-, 2-, 2,5- i 3-krotnemu współczynnikowi zapasu, dzięki czemu otrzymano dla każdego rodzaju przekaźnika pięć punktów pomiarowych. Odpowiednie wartości energii rozłączania zawierają się w granicach 10^3 - 10^6 erga i są prawie proporcjonalne do kwadratu indukcyjności rozłączania w zakresie prądów stacjonarnych od 5 mA do 1 A.

Na rysunku 7 przedstawiono energię rozłączania w funkcji amperozwojów. Zależność ta określona jest w przybliżeniu wyrażeniem

$$\frac{1}{2} L_1 I^2 \approx 0,2 \cdot \theta^2, \quad (14)$$

w którym $\frac{1}{2} L_1 I^2$ wyraża się w ergach, a θ w amperozwojach.

Na rysunku 8 przedstawiono zaś przykładowo trwałość zestyków zwiernych przekaźnika płaskiego 48 w zależności od parametrów rozłączanego obwodu.

Także H. Isert [17] stwierdza, że zużycie elementów zestyku rurkowego spowodowane zamykaniem obwodu jest do pominięcia w porównaniu z zużyciem przy jego otwie-

raniu. Głównymi przyczynami zużycia i zawodności styczek są według niego krótkie łuki i wyładowania przejściowe, podczas gdy wyładowanie świetlące przyczynia się tylko w pewnej mierze do erozji styczek przez powodowanie rozpylania materiału stykowego, które jednak nie wpływa na nieprawidłowe działanie zestyku.

Podobny pogląd wyraża H.N. Wagar [39], według którego przy otwieraniu zestyku obciążonego przekąźnikiem dominują wyładowania przejściowe. I tak najpierw występuje przebicie w gazie (powietrzu), które raptownie przechodzi w światlenie, a to z kolei natychmiast przemienia się w łuk, który trwa bardzo krótko, gdyż powstaje fala napięcia, wędrująca od styku do obciążenia oraz powracająca odbita z odwrotnym znakiem i wygaszająca łuk. Następnie ponownie powstaje przebicie, a przebieg powtarza się, objawiając się w postaci tzw. wyładowań przejściowych, przy czym w przypadku bardzo małych odstępów styczek przebicie może przejść bezpośrednio w łuk, gdy napięcie przekroczy wartość V_m . Ta właśnie seria wyładowań przejściowych powoduje zdaniem Wagara największe niszczenie styczek, w którym główną rolę odgrywają bardzo krótkie, lecz o dużym natężeniu prądu łuki, o prądzie i czasie trwania zależnych od parametrów obwodu, m.in. pojemności przewodu montażowego.

H.N. Wagar podaje wzór empiryczny na tzw. "współczynnik energii obciążenia" E_c

$$E_c = (E_m + 0,1 I_0) \quad (15)$$

Dane charakterystyczne styków do badań prądkoindukcyjnych i elektromagnesów

Określenie podzespołu /do rys. 6.17/	Rodzaj podzespołu	Cewka			Kotwica		Liczba parocewojów przyłączeniowych
		Wzrostanoja	Ilość zwojów	Srednica drutu nawojowego	Skok	Grubość prądkoindukcyjnej	
				mm	mm	mm	A3
1	Prądkoindukcyjny płaski 48	80	1800	0,18	1,5	0,1	117
2	" "	1000	14000	0,12	1,5	0,1	117
3	" "	3000	25000	0,09	1,3	0,1	117
4	Mały prądkoindukcyjny okrągły 34	800	8000	0,08	1,3	0,1	139
5	Mały prądkoindukcyjny próbny 52	1700	8300	0,06			64
6	Elektromagnes wybieraka podnosząco-obrotowego	60	2500	0,22			
7	Elektromagnes wybieraka wstępnego	300	4700	0,14			
8	Łożysko rolkowe	3000	26400	0,06			

w którym

E_m - energia magnetyczna zmagazynowana w cewce indukcyjnej i mierzona w obwodzie z kondensatorem jako $E_m = C_o V_p^2 / 2$ (C_o pojemność kondensatora, V_p - napięcie szczytowe),

I_o - prąd ustalony obwodu,

stwierdzając, że trwałość zestyku może być dostatecznie dokładnie określona przez ten współczynnik, co przedstawia rys. 9. Natomiast całkowita energia łuków w powstałej przy rozdzielaniu się styków szczelinie może być według niego wyrażona przybliżoną zależnością

$$E_A \approx A (E_m + B I_o)$$

w której

$$A = \left(\frac{C}{C_0} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{V_A}{V_0}$$

i

$$B = \frac{m}{2w} \frac{V_0^2}{V_1} \left(\frac{C}{C_0} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{N^2}{R} \frac{1}{R}$$

przy czym

C - pojemność okablowania,

V_0 - napięcie baterii,

V_A - napięcie łuku,

R - rezystancja magnetyczna obwodu magnetycznego,

R - rezystancja obciążenia,

N - liczba zwojów cewki,

w - parametr związany z liczbą przebić, szybkością rozłączania i zmiennymi obwodu,

$m = 1 - V_0/V_1$, gdzie V_1 minimalne napięcie przebicia.

Z przedstawionych w niniejszym rozdziale rozważań wynika więc, że prawa rządzące przebiegiem zjawisk w otwierającym się zestyku nie są jeszcze dokładnie poznane lub są może zbyt skomplikowane do przeprowadzenia uogólnień, wobec czego istnieją różne podejścia, przede wszystkim odnośnie korelacji między parametrami komutowanego obwodu i trwałością zestyku, który w tej komutacji bierze udział.

2.3.2. Przebieg zjawisk fizycznych w zestyku przerywającym typowy obwód komutacyjny

Jak już wspomniano, w urządzeniach telekomunikacyjnych, a zwłaszcza w urządzeniach komutacyjnych obciążeniem najczęściej występującym jest obciążenie indukcyjne. Obwód komutacyjny, w najprostszej postaci składa się mianowicie z baterii, obciążenia indukcyjnego (na przykład cewki przekaźnika), opornika włączonego w szereg (przeważnie w postaci rezystancji uzwojenia cewki) i zestyku.

Zestyk i jego obciążenie z reguły są jednak rozdzielone i łączone elektrycznie przewodami większej lub mniejszej długości, ^a ponieważ wiązki tych przewodów biegną wspólnie, nieuchronnym następstwem jest występowanie zarówno pojemności sprzężeniowych między żyłami, jak i pojemności doziemnych żył. Wpływ tych pojemności na rodzaj i intensywność zjawisk w przebiegu rozłączania zestyku, jak już częściowo wspomniano, jest znaczny i będzie dalej omówiony nieco szerzej.

Mostki [2, 25, 26, 27, 34]

W stanie zamkniętym między elementami stykowymi powstaje określona powierzchnia styku, która zależy od nacisku stykowego. Jeśli powierzchnię tę sprowadzi się do powierzchni koła, w przypadku styczek kulistych jej promień można wyrazić wtedy zależnością [2]:

$$a \approx 0,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E}}, \quad (17)$$

w której

P - nacisk stykowy,

r - promień kulistej części styckiej,

E - moduł sprężystości podłużnej.

I tak w przypadku stycek srebrnych przy $E=8000 \text{ kg/mm}^2$, $r = 0,15 \text{ cm}$ i $P = 20 \text{ G}$ promień powierzchni styku $a = 9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ i powierzchnia $s = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$. Jeśli natężenie prądu ustalonego, przepływającego przez zestyk, wynosi $0,5 \text{ A}$, gęstość prądu w miejscach styku wynosi $j = 2 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$.

Gdy rozpoczyna się otwieranie zestyku, powierzchnia styku maleje, a ponieważ natężenie prądu praktycznie nie zmienia się, gęstość prądu wtedy zwiększa się, osiągając wartości rzędu $10^7 + 10^8 \text{ A/cm}^2$; ponadto zwiększa się również spadek napięcia i opór zestyku. Główna część energii elektrycznej przepływającego prądu ulega wówczas przemianie w ciepło Joule'a, a ponieważ odprowadzanie tego ciepła jest niedostateczne przy szybko rosnącej gęstości prądu, powierzchnia stykowa i jej okolice intensywnie nagrzewają się, osiągając tak wysoką temperaturę, iż część materiału stykowego przechodzi w stan ciekły. Pod wpływem działających napięć powierzchniowych tworzy się wtedy ze stopionego metalu mostek między oddalającymi się elementami stykowymi, przy czym w miarę oddalania się elementów stykowych spadek napięcia na mostku rośnie i temperatura mostka osiąga wreszcie temperaturę wrzenia materiału styckiej, po czym mostek przerywa się gwałtownie. Najbardziej gorąca część mostka znajduje

się w pobliżu styczki dodatniej, wskutek czego przerwanie mostka zachodzi niesymetrycznie, powodując ubytek materiału na anodzie i wytwarzanie się narośli na katodzie. W przypadku zestyku hermetycznego przerwanie mostka wyzwała falę ciśnienia około 50 razy większego niż ciśnienie gazu, którym jest wypełniona rurka, rozchodząca się na wszystkie strony. Wskutek powyższego cząstki metaliczne i para metalu eksplodującego mostka, wyrzucone z dużą siłą, przyklejają się do wewnętrznej ścianki rurki szklanej w postaci spłaszczonych kuleczek różnej wielkości.

Na rysunku 10 przedstawiono wykres spadku napięcia stykowego przy tworzeniu się mostka w funkcji czasu oddalania się elementów stykowych z palladu. Napięcie to zwiększa się od kilku miliwoltów do około 1,5 V (zależnie od materiału stykowego), w wyniku czego rośnie temperatura miejsca styku, a później mostka, osiągając dwa charakterystyczne punkty topnienia i wrzenia metalu. Czas trwania mostków wynosi 50-100 mikrosekund, a odstęp między elementami stykowymi po tym czasie 10^{-5} cm, wobec czego jest on mniejszy niż długość swobodnej drogi elektronu.

Zależnie od materiału stykowego tworzą się mostki o jednakowej średnicy przy obydwu elektrodach (Pt, Pd, PtIr₂₀, PdAg₄₀, AuAg₂₅Pt₆) lub mostki o większej średnicy przy anodzie (Au, Ag, AuAg₃₀, AgPd₂₀), przy czym te ostatnie materiały odznaczają się większym przenoszeniem materiału stykowego. Średnie średnice mostków najczęściej stosowanych materiałów stykowych zawierają się w granicach $3 \cdot 10^{-3}$ - $15 \cdot 10^{-3}$ mm.

W wyniku pęknięcia mostka powstaje między styczkami szczelina zawierająca cząsteczki gazu i pary metalu o dość małym napięciu jonizacji, podczas gdy powierzchnie styków pokrywają się kroplami stopionego materiału stykowego. Taki stan stwarza dogodne warunki do wyładowań elektrycznych, których mostek staje się jakby inicjatorem.

Przebieg wyładowań elektrycznych, które pojawiają się z kolei w powstałej wskutek pęknięcia mostka szczelinie stykowej, może być natomiast różny, gdyż zależy on od wielu czynników, m.in. od materiału stykowego, czystości powierzchni, właściwości gazu, szybkości rozwierania styków i właściwości obwodu komutacyjnego.

Krótkie łuki [2]

W dalszym ciągu, tuż po rozerwaniu się mostka, przez około 10^{-8} s, końce pękniętego mostka mają temperaturę 2000° do 4000° , co powoduje, że praca wyjścia elektronów z materiału stykowego jest wówczas niewielka. W powstałej szczelinie znajdują się więc w postaci gazowej atomy metalu częściowo zjonizowane i częściowo w stanie obojętnym.

Wskutek przerwania obwodu napięcie w szczelinie rośnie, a ponieważ szczelina jest jeszcze bardzo mała, natężenie pola osiąga wysoką wartość. Skoro tylko zostanie przekroczone napięcie jonizacji, jonizują się z kolei wolne i obojętne dotąd atomy, w wyniku czego zwiększa się szybko liczba nośników ładunku, powodując lawinę elektronów, gwałtownie wypełniającą przestrzeń wyła-

dowania, oraz w następstwie zapłon krótkiego łuku. Do zapalenia i podtrzymania stacjonarnego wyładowania łukowego niezbędne jest przy tym osiągnięcie przez prąd minimalnego prądu łuku I_m .

Mechanizm wyładowania zmienia się jednak po osiągnięciu między rozdzielającymi się elementami stykowymi odległości równej kilkakrotnej drodze swobodnej elektronów. Uwolnione wskutek zimnej emisji elektrony tylko rzadko osiągają bowiem wtedy anodę i nie mogą spowodować dużego jej nagrzania, w wyniku czego jonizują one raczej cząstki powietrza w szczelinie, powodując zapłon wyładowania świetlącego. Zjawisko wyładowania świetlącego opisano już w 2.2.

Wyładowania przejściowe [15, 32, 34, 31, 39, 42]

W obwodach z małymi prądami ustalonymi, które same są niezdolne do spowodowania zapłonu lub podtrzymania łuku, a więc z zasady w obwodach telekomutacyjnych, występują także tzw. wyładowania przejściowe [15, 31, 42]. Wyładowania te trwają bardzo krótko, gdyż są one podtrzymywane przez małe pojemności i indukcyjność w obwodzie, których energia szybko zużywa się.

Niech przykładem obwodu charakterystycznego pod względem wyładowań przejściowych będzie obwód składający się z baterii 50 V, indukcyjności (przełącznika telefonicznego) i linii w postaci przewodów o długości 100 m, doprowadzonych do zestyku [15], przedstawiających sobą pewną pojemność, indukcyjność i rezystancję. W obwodzie tym styk przerywa się całkowicie po 0,08 milisekundy od

rozpoczęcia rozdzielania się elementów stykowych, gdy trwały prąd 0,1 A jest za mały do zapalenia łuku, wobec czego wskutek wpływu indukcyjności następuje w tym czasie tylko naładowanie pojemności linii, przy czym napięcie rozdzielającego się styku wzrasta z szybkością około $1,5 \cdot 10^7$ V/s. Natomiast w czasie od $t = 0,08$ do $t = 0,1$ ms indukcyjność ładuje linię do napięcia około 300 V, wystarczającego do spowodowania zapłonu wyładowania świetlającego w szczelinie, które z kolei natychmiast rozwija się w łuk, podtrzymywany przez ładunek linii przez około $5 \cdot 10^{-5}$ s.

Po tym czasie łuk rozładowuje przyległą część linii i gaśnie z powodu niedostatecznego prądu, lecz indukcyjność naładowuje wtedy linię na nowo, aż wystąpi w szczelinie przebicie, znów przy około 300 V. Również to wyładowanie rozwija się jednak natychmiast w łuk, który gaśnie przy przechodzeniu prądu przez wartość zerową wytworzonych oscylacji, ale plazma łuku pozostaje tym razem przewodząca dostatecznie długo, aby umożliwić odnowienie zapłonu w przeciwnym kierunku podczas następnej połowy cyklu oscylacji w obwodzie. Proces taki powtarza się kilka razy, aż w końcu szczelina jest za duża do wytworzenia przebicia, a pozostająca energia pojemnościowa i indukcyjna rozprasza się w postaci tłumionych drgań. Przebieg powyższy przedstawia oscylogram na rys. 11.

Jak widać z powyższego przykładu, obecność indukcyjności i pojemności w obwodzie zestyku jest okolicznością sprzyjającą do powstania iskrzenia, które inaczej nie mogłoby się pojawić. I tak indukcyjność dostarcza na-

pięć wyższych niż napięcie baterii, a pojemność może zapewnić impulsy prądu większe niż I_m , czyli minimum prądu wymaganego dla łuku, chociaż prąd ustalony może być mniejszy niż I_m .

Otwieranie się podobnego obwodu W.L. Scott [32] ilustruje wykresem przebiegu napięcia w czasie (rys. 12), na którym występują trzy charakterystyczne przedziały: wyładowania przejściowe, oscylacje wielkiej częstotliwości i wyładowanie świetlące.

Mechanizm powstawania wyładowań przejściowych opisał dokładnie G.W. Mills [42], który przeprowadzał badania wyładowań elektrycznych w zestyku otwierającym obwód z baterią, zawierający indukcyjność, rezystancję i pojemność doprowadzeń, przy ograniczeniu prądu ustalonego I_0 poniżej minimum prądu łuku I_m oraz długości przewodów doprowadzających większej niż 6 m. Stwierdził on bowiem, że przy mniejszej długości przewodów wyładowania przejściowe miały tendencję do przemiany w wyładowania świetlące. Oczywiście przy dużych długościach przewodów doprowadzających ich duża pojemność odgrywa rolę gasika, uniemożliwiając przebicie. Mills stwierdził ponadto, że bardzo trudno jest otrzymać powtarzalne przebiegi łuków przejściowych, nawet przy zachowaniu stałych warunków i parametrów obwodu, jakkolwiek w przybliżeniu charakter wyładowań jest powtarzalny.

Mills badał również wpływ szybkości rozdzielania się styczek, obciążenia i pojemności przewodów doprowadzających. Wyniki badań wpływu pierwszego czynnika na przebieg wyładowań przedstawiono na rys. 13, z którego wi-

dać, że ze wzrostem szybkości rozdzielania się styczek rośnie napięcie przebicia i maleje liczba przebić, a także zmniejsza się czas trwania łuków. Na rysunku 14 przedstawiono natomiast wpływ obciążenia na przebieg wyładowań, które zwiększano przez równoległe dołączanie takich samych przekładników jako obciążenie zestyku, co powodowało zwiększanie się liczby przebić i czasu trwania łuków. Na rysunku 15 pokazano zaś wpływ długości przewodów połączeniowych na przebieg wyładowań, z którego widać, że ze wzrostem długości przewodów maleje liczba przebić.

2.4. Zjawiska zachodzące przy zamykaniu zestyku

[2, 15, 20, 26, 28, 32]

Zbliżanie styczek przy zamykaniu obwodu elektrycznego może wywołać dwa zasadnicze rodzaje wyładowań w zmniejszającej się szczelinie: a) wyładowanie świetlące, poprzedzone przebicciem, które wymaga jednak odpowiednio wysokiego napięcia, rzędu kilkuset woltów, i raczej nie występuje w przypadku układów telekomutacyjnych, oraz b) wyładowanie łukowe, które pojawia się przy znacznym zbliżeniu styczek, rzędu 10^{-4} cm, będące wyładowaniem dominującym w układach telekomutacyjnych.

Wcześniejsze badania sugerowały, że wzrastające natężenie pola elektrycznego powoduje przy odpowiednim zbliżeniu styczek emisję elektronów z katody, doprowadzającą do zapłonu łuku (Germer i inni). W późniejszych pracach [15] wysunięto jednak przypuszczenie (Holm), że

powodem powstawania łuku są włoski metaliczne (whiskers), wytwarzające się na powierzchniach styków, których zetknięcie się wywołuje przepływ prądu o znacznej gęstości, powodujący z kolei ich stopienie i odparowanie (eksplozję powstałego mostka), wskutek czego zapala się łuk. Dalsze zbliżenie styków powoduje zetknięcie się następnych nierówności powierzchni stykowej, zgaśnięcie łuku; ponowną eksplozję kolejnego stopionego mostka i znów zapłon łuku, co może powtórzyć się kilkakrotnie, aż do całkowitego zetknięcia się styków. Zjawiskom tym sprzyja aktywacja styków wskutek oddziaływania par organicznych, w wyniku której znacznemu zmniejszeniu (nawet do 1/10 wartości w przypadku czystych metali) ulega prąd minimalny łuku.

W. L. Scott [32] podaje przykład zamykania zestykiem obwodu składającego się z linii połączeniowej o impedancji falowej $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, równej w przybliżeniu 100Ω , oraz z przekaźnika uruchamianego tym zestykiem i baterii o napięciu 50 V (rys. 16). Żyłka a-a ładuje się w tym obwodzie do potencjału źródła napięcia, a gdy stycki zestyku L1 zaczynają się zwierzać, wówczas albo przez przedwczesne rozładowanie wskutek wyładowania łukowego albo też ostatecznie przez metaliczny już styk, linia rozładowuje się oscylacyjnym prądem tłumionym o wartości szczytowej $\frac{V}{Z_0}$ (w danym przykładzie $\frac{50}{100} = 0,5\text{ A}$). Częstotliwość prądu rozładowania, określona przez różnicę wartości indukcyjności i pojemności okablowania, może być przy tym rzędu MHz.

Taki typowy oscylogram wyładowania linii przez zamykające się styczki w centrali telefonicznej o napięciu zasilania 50 V przedstawiono na rys. 17.

2.5. Wpływ niektórych czynników i warunków pracy na przebieg wyładowań i trwałość styczek [5, 19, 24, 26, 32, 36]

Wpływ parametrów obwodu na przebieg wyładowań i trwałość styczek został zbadany przez H. Stockera [34] w układzie przedstawionym na rys. 18, który składał się z badanego zestyku hermetycznego, przekaźnika płaskiego typu 48, oporników R_V i R_S oraz baterii o napięciu 60 V. Symulując pojemność doziemną C_E przez kondensator o zmiennej pojemności i zwiększając jej wartość począwszy od zera, otrzymywał on dla każdego rodzaju zestyku typowe w znacznej mierze przebiegi wyładowania podczas otwierania obwodu, a zmieniając prąd stacjonarny I - wykres $C_E = f(I)$, przedstawiony na rys. 19. Dwie krzywe graniczne dzielą na nim obszar ćwiartki koła na trzy obszary, każdy o innym typie wyładowania, a mianowicie dolny, obejmujący wyładowanie świetlące, środkowy - obejmujący wyładowanie przejściowe i górny - będący obszarem wyładowań beziskrowych. Przy ustalonym prądzie I opornik R_S zwęża niebezpieczny obszar wyładowań przejściowych, co widać także na wykresie $C_E = f(R_S)$, przedstawionym na rys. 20.

Pojemność doziemna C_E ma również wpływ na liczbę wyładowań w wyładowaniach przejściowych, przy czym istnieje

je maksimum liczby wyładowań, dla określonej pojemności, które przesuwają się (zresztą wraz z całą krzywą) w miarę wzrostu częstotliwości zadziałań zestyku w kierunku mniejszych wartości C_E .

Pojemność własna przekaźnika również wpływa na postać wyładowania wytwarzającego się podczas otwierania zestyku, przyczyniając się do gaszenia iskry, a wpływ pojemności doprowadzeń omówiono już uprzednio [5, 24, 39, 42].

Wzrost częstotliwości powoduje także zwiększanie obszaru wyładowań przejściowych na wykresie $C_E = f(R_g)$. Natomiast trwałość zestyków hermetycznych przy obciążeniu indukcyjnym nie zależy od częstotliwości zadziałań przy pracy ciągłej i zmniejsza się znacznie ze wzrostem częstotliwości przy pracy przerywanej (rys. 21) [16].

Trwałość styczek określona jest głównie przez rodzaj wyładowania w przebiegu rozłączania, przy czym szczególne znaczenie, jak widać z powyższych rozważań, mają nieuniknione, przeważnie bliżej nieznanne pojemności doziemne i sprzężeniowe między obwodami, które w znacznej mierze decydują o postaci wyładowania. Trwałość zestyku hermetycznego (liczbę zadziałań) w funkcji długości przewodów doprowadzeniowych, a więc w funkcji pojemności doziemnych i sprzężeniowych, przedstawiono na rys. 22, z którego widać, że trwałość zwiększa się w obszarze gaszenia iskry i zmniejsza w obszarze wyładowań przejściowych.

Rodzaj gazu i jego ciśnienie (w przypadku zestyków hermetycznych) mają także duży wpływ na trwałość zesty-

ków, przy czym trwałość zestyków zmniejsza się ze wzrostem ciśnienia gazu [34]. Oddziaływanie par organicznych wydzielających się z tworzyw sztucznych powoduje aktywację stycek z niektórymi metalami szlachetnymi, co uwiadcza się w zbieraniu się czarnego lub brązowego osadu na powierzchni stycek oraz przejawia się w obniżeniu wartości prądów granicznych łuku nawet do 0,03 - 0,05 A [26]. Następstwem aktywacji jest więc szybsze inicjowanie łuku i dłuższe jego trwanie (zwłaszcza przy zamykaniu zestyku), co powoduje zwiększone zużycie stycek, a także powstawanie łuku w warunkach, w których normalnie, przy czystych styckach, nie byłoby w ogóle możliwości jego powstania. Zjawisko to może doprowadzić do wyładowań łukowych mimo zabezpieczeń gasikowych.

Również szkodliwe jest tworzenie się różnych produktów chemicznych na powierzchniach elementów stykowych, które zależy od warunków klimatycznych i stopnia zanieczyszczenia atmosfery. Duża wilgotność względna powietrza sprzyja przy tym wytwarzaniu się obcych warstewek, lecz pomaga w gaszeniu łuku [32]. Drgania stycek mogą powodować przejściowe wahania oporu stykowego, a odskoki po zamknięciu - dodatkową niezamierzoną przerwę obwodu, co z kolei powoduje niekorzystne zjawiska wyładowań elektrycznych, prowadzące do znacznie szybszego zużycia materiału stykowego. Teorie drgań i odskoków stycek w zestykach hermetycznych przedstawił wyczerpująco R.O. Jenkins [19].

3. SKUTKI STANU NIE USTALONEGO PODZAS PRZEŁĄCZANIA ZESTYKÓW

Podczas przełączania zestyków występują trzy zasadnicze rodzaje szkodliwych skutków, a mianowicie przebicie izolacji z powodu udaru napięciowego, zakłócenia innych obwodów oraz uszkodzenie i zużycie elementów stykowych.

Przebicie izolacji z powodu udaru napięciowego [32]

Podczas przerywania obwodów zawierających indukcyjności powstają na zestykach przerywających te obwody przepięcia o wartości powyżej 1000 V. Jeśli nie są więc stosowane ochronne układy gasikowe, przepięcia te mogą spowodować przebicia izolacji przewodów i elementów.

Zakłócenia innych obwodów [32]

Główne przyczyny zakłóceń w centralach telefonicznych i drogi rozchodzenia się zakłóceń przedstawiono schematycznie na rys. 23. Należą do nich indukowane napięcia, przepięcia i przetężenia w przewodach oraz lokalne oscylacje wielkiej częstotliwości wskutek iskrzenia zestyków.

Napięcia zakłócające mogą oddziaływać na własny obwód lub inne obwody wskutek przenoszenia energii. Przeniesienie energii może nastąpić wskutek sprzężenia przez wspólną impedancję, przez sprzężenia indukcyjne lub pojemnościowe przewodów oraz przez promieniowanie pola elektromagnetycznego. Sprzężenie przez wspólną impedancję jest to sprzężenie przez baterię lub wspólne uzię-

mienie, a sprzężenia indukcyjne lub pojemnościowe powstają przez równoległe prowadzenie przewodów albo przez oddziaływanie sąsiednich elementów.

Skutkami napięć zakłócających są szumy w obwodach rozmównych i błędne działanie obwodów. Szumy są na ogół wywoływane przejściowymi napięciami indukowanymi w cewkach oraz falami prądowymi wywołanymi iskrzeniem, a błędy komutacji mogą występować, gdy napięcia zakłócające powodują fałszywe sygnały lub wadliwe działanie przekazników, bramek elektronicznych itp.

Szkodliwym zjawiskiem jest także zmiana charakteru wyładowania w otwierających obwód elementach stykowych z wyładowań świetlanych w postać bardziej szkodliwą, a mianowicie w łuk, pod wpływem indukowanego udaru napięciowego [34].

Oddziaływanie napięć zakłócających, wynikających z działania urządzeń telefonicznych na odbiór radiowy i telewizyjny, jest na ogół niewielkie, głównie dzięki usytuowaniu większości central w polu silnych sygnałów, jak również dzięki efektowi ekranowania przez metalowe konstrukcje central, kable i urządzenia. Ponadto gasiki, przystosowane do obwodów przełączanych zestykami pod względem zmniejszenia ich zużycia, skutecznie tłumią lub ograniczają większość potencjalnych napięć zakłócających już przy źródle ich powstawania.

Zagadnienia związane z zakłóceniami odbioru radiowego i telewizyjnego oraz z tłumieniem tych zakłóceń opisano szczegółowo w pracy zbiorowej na ten temat [40].

Uszkodzenia i zużycie elementów stykowych [16, 32, 34]

Erozja styczek wpływa na stopniowe pogarszanie się ich własności z powodu zmniejszania się nacisku stykowego i zwiększania się podatności na błędne zadziałania spowodowane dużym oporem styku. Postać i wielkość erozji zależą od różnych czynników, -które omówiono w poprzednich rozdziałach.

Podczas przełączania zestyków zachodzą zjawiska przenoszenia materiału stykowego, wytwarzania się mostków i przywierania styczek. Przenoszenie może być nieregularne, rozproszone na całej powierzchni lub też może utworzyć ostrze albo narośl, które mogą mieć wygląd od cienkich włosków do nieregularnych występow, często dostatecznie długich, aby utworzyć mostek między styczkami. Na styoczce przeciwległej często powstaje przy tym krater, a wtedy taka para styczek ma tendencję do blokowania przełączania.

Przywieranie styczek może być spowodowane przez adhezję między bardzo czystymi powierzchniami lub też przez zgrzewanie się elementów stykowych. Przywieranie wskutek adhezji styczek narażonych na oddziaływanie atmosfery jest rzadkie z powodu wytwarzania się na nich warstewek powierzchniowych. Dlatego też na ogół zgrzewanie zachodzi w zestykach hermetycznych przez powstanie drobnych metalicznych mostków, wytwarzających się zwłaszcza podczas zamykania obwodu elektrycznego, przede wszystkim przy pracy przerywanej zestyku [16]. Powodem tego jest nagrzewanie się elementów stykowych pod-

czas przełączania wskutek wyładowań elektrycznych, które powoduje ich wydłużanie się (rzędu mikronów), przy czym powstałe pod wpływem wyładowań narośla anodowe i wgłębienia katodowe stale powiększają się i na razie pasują do siebie podczas pracy ciągłej zestyku. Natomiast podczas dłuższej przerwy w pracy, elementy stykowe oziębiają się, wskutek czego narośla i wgłębienia zmieniają nieznacznie położenie, co powoduje zgrzewanie zestyku w wyniku wzajemnego tarcia powierzchni narośli i wgłębień.

Przyczyny przenoszenia materiału stykowego, rodzaj przenoszenia, czynniki wpływające na przenoszenie i skutki przenoszenia są szczegółowo omówione przez A. Piątkowskiego [26] i H. Stockera [34].

4. UKŁADY ZABEZPIEZAJĄCE PRZED NADMIERNĄ EROZJĄ

4.1. Uwagi ogólne

Ograniczenie nadmiernego zużycia elementów stykowych przekaźników telefonicznych, spowodowanego erozją elektrotermiczną, jest możliwe do osiągnięcia za pomocą różnych następujących sposobów:

- doboru odpowiednich materiałów stykowych, bardziej odpornych na erozję (o wyższej temperaturze topnienia),
- doboru kształtu powierzchni stykowych,
- zmniejszenia odskoków przez odpowiednią konstrukcję zespołu zestyków,

- ograniczenia wpływu atmosfery przez umieszczenie zestyków w hermetycznych, wypełnionych gazem obojętnym rurkach szklanych (hermetyczne zestyki rurkowe),
- zmniejszenia aktywacji powierzchni elementów stykowych przez unikanie konstrukcji zawierających tworzywa organiczne, których pary powodują nadmierną aktywację,
- stosowania odpowiednich układów elektrycznych, nazywanych układami gaszącymi lub układami gasikowymi albo po prostu gasikami, które zmieniają warunki przebiegów nie ustalonych podczas przerywania obwodów elektrycznych, wpływając na rodzaj i pochłaniając częściowo energię powstających w takich przebiegach wyładowań elektrycznych.

Tendencją ogólną jest przy tym jednocześnie stosowanie większości powyższych sposobów ograniczania zużycia elementów stykowych.

Przedmiotem dalszych rozważań będą układy gaszące w obwodach przekaźników telefonicznych, których stosowanie będzie rozpatrzone w nieco zwężonym zakresie. I tak omawiane układy gaszące będą dotyczyły ochrony zestyków przekaźników komutujących obwody prądu stałego, ponieważ znaczna większość przekaźników telefonicznych pracuje w takich właśnie obwodach, a ponadto poziom napięć przemiennych komutowanych przekaźnikami telefonicznymi jest na ogół znacznie niższy od poziomu napięć stałych. Stosowanie układów gaszących do ochrony zestyków komutujących obwody prądu przemiennego omówione jest w artykule E. Habigera [14].

Stosowanie układów gaszących będzie poza tym rozpatrywane z punktu widzenia zabezpieczenia elementów stykowych przed nadmiernym zużyciem, a nie z punktu widzenia generowania przez zestyki zakłóceń innych obwodów elektrycznych, ponieważ prawidłowo zaprojektowane układy gaszące zarówno chronią elementy stykowe przed nadmiernym zużyciem, jak i ograniczają poziom zakłóceń elektrycznych.

Ponadto stosowanie układów gaszących będzie głównie rozpatrywane z punktu widzenia ochrony zestyków komutujących prądy mniejsze niż minimalny prąd łuku, co stwarza warunek niepowstawania trwałego łuku elektrycznego oraz obejmuje obszar wyładowań przejściowych i wyładowań świetlących. Również powyższy warunek spełnia znakomita większość przekaźników telefonicznych.

Przy spełnieniu tego ostatniego warunku podstawowym zadaniem układu gaszącego jest ograniczenie do takiej wartości napięcia indukowanego w cewce przekaźnika, stanowiącej obciążenie zabezpieczanego zestyku, aby podczas całego przebiegu nie ustalonego przy otwieraniu zestyku było ono zawsze mniejsze niż napięcie przebiccia (napięcie zapłonu wyładowania świetlącego), co zapobiega wyładowaniom przejściowym. Natomiast w warunkach komutacji prądów większych od minimalnego prądu łuku układ gasikowy nie zapobiega zapłonowi łuku [15], a celem jego stosowania jest wtedy tylko skrócenie czasu trwania łuku.

Gasiki nie zabezpieczają także zestyku przed powstawaniem mostka [27] i właściwie w pełni chronią elementy

stykowe tylko przed wyładowaniami przejściowymi (w tym świetlącymi).

W urządzeniach teletechnicznych stosuje się następujące zasadnicze układy gaszące:

- oporniki linearne (rezystory drutowe lub ostatecznie warstwowe),
- oporniki nielinearne (niesymetryczne - prostowniki i diody oraz symetryczne - oporniki z węgla krzemu, nazywane warystorami),
- kondensatory z szeregowo połączonymi opornikami,
- układy kombinowane (mieszane), będące kombinacjami powyższych prostych układów.

Układ gaszący zestyku jest dołączany zwykle jako bocznicnik do indukcyności, na przykład do cewki przekąźnika lub bezpośrednio do zabezpieczanego zestyku. Wprowadzenie takiego dodatkowego układu do obwodu elektrycznego oddziałuje oczywiście na ten obwód, zmieniając w przypadku przekąźnika czasy jego działania oraz wprowadzając w pewnych przypadkach dodatkowe obciążenie prądowe zabezpieczanego zestyku.

Podstawowym zadaniem układu gaszącego jest niedopuszczenie do zapłonu wyładowania świetlącego podczas rozdzielania się elementów stykowych, a więc takie ograniczenie napięcia na otwierającym się zestyku, aby w każdej chwili było ono mniejsze niż napięcie przebicia. Napięcie przebicia przy danym rodzaju gazu w szczelinie i określonym materiale elementów stykowych jest zależne

od iloczynu ciśnienia gazu i odstępu elementów, co w postaci krzywej Paschena przedstawiono na rys. 2. Jak już wspomniano, przy jej omawianiu, taki przebieg napięcia, z występującym minimum, jest słuszny tylko dla zupełnie czystych powierzchni stykowych i przy niezbyt małych odległościach elementów, gdyż przy bardzo małych odległościach rozwierających się elementów stykowych oraz przy zanieczyszczonych powierzchniach zapłon w szczelinie może wystąpić przy znacznie mniejszych napięciach.

Uwzględniając powyższe otrzymuje się charakterystykę zapłonu otwierającego się zestyku przez związanie krzywej Paschena z przebiegiem mechanicznym rozdzielania się elementów stykowych. Taką charakterystykę dla elementów stykowych ze złota, działających w atmosferze zawierającej mieszaninę azotu i wodoru w stosunku 97/3 przy ciśnieniu 760 torów, przedstawia P. Lohse [44] (rys. 24), który szeroko omawia bardzo istotne zagadnienie wpływu szybkości otwierania zestyków na charakterystyki zapłonu i gaszenia wyładowań, na co zwracają uwagę także inni autorzy [15, 29, 38, 48 itd].

Podsumowując można stwierdzić, że od dobrze zaprojektowanego układu gaszącego trzeba wymagać [43]:

- uniemożliwienia zapłonu wyładowania elektrycznego,
- możliwie małego wpływu na pracę elementów wchodzących w skład obwodu zabezpieczanego zestyku,
- możliwie małego dodatkowego obciążenia prądowego zabezpieczanego zestyku,
- nieskomplikowanej budowy i małego kosztu.

Poniżej będą omówione z kolei podstawowe układy gaszące stosowane do ochrony zestyków przekaźników telefonicznych.

4.2. Układ gaszący kondensatorowo-rezystorowy

4.2.1. Uwagi wstępne

Układ ten, nazywany dalej również gasikiem RC, jest najdawniej i chyba najpowszechniej stosowanym, bardzo skutecznym oraz najlepiej opisanym w literaturze technicznej układem gaszącym. Dlatego też i w niniejszym opracowaniu będzie poświęcone jemu najwięcej miejsca.

Gasik RC jest szeregowo połączonym układem opornika (rezystora) i kondensatora. Gasik ten można przyłączyć równolegle do zabezpieczanego zestyku lub do cewki przekaźnika, stanowiącej obciążenie zestyku, co przedstawiono na rys. 25.

W celu określenia wartości elementów R i C gasika należy najpierw ustalić przebiegi napięcia na zestyku podczas jego rozłączania w zależności od tych wartości. Przebiegi te można ustalić drogą obliczeń lub doświadczalnie, tak dobierając elementy gasika, aby występujące w otwierającym się zestyku napięcie zawsze było mniejsze niż napięcie zapłonu.

4.2.2. Przebieg napięcia w otwierającym się zestyku przy stałej indukcyjności obciążenia

Przebieg napięcia podczas otwierania zestyku będzie w takich warunkach jednakowy w obydwu wariantach przyłączenia gasika według rys. 25.

W przypadku gasika przyłączonego równolegle do zestyku napięcie na nim z chwilą rozpoczęcia otwierania się zestyku ($t = 0$) praktycznie równa się zero ($U_k(0) = 0$). Ponieważ zaś kondensator o pojemności C jest wówczas rozładowany, co odpowiada $U_c(0) = 0$, w obwodzie płynie wtedy prąd ustalony $I = \frac{U_B}{R}$, który, jak widać, zależy tylko od rezystancji cewki R .

Od tej chwili rozdzielające się elementy stykowe zaczynają zmieniać powyższy stan, przy czym, zgodnie z prawem Kirchoffa, suma napięć w zamkniętym obwodzie jest równa zero, wobec czego

$$U_R + U_r + U_L + U_c = U_B, \quad (18)$$

gdzie indeksy oznaczają spadki napięć, odpowiednio na opornościach rzeczywistych (U_R i U_r), indukcyjności (U_L), pojemności (U_c) oraz na baterii (U_B).

Ponieważ $U_L = L \frac{di}{dt}$ oraz $U_c = \frac{1}{C} \int i dt$

$$L \frac{di}{dt} + (R + r) i + \frac{1}{C} \int i dt = U_B, \quad (19)$$

a spadek napięcia na zestyku wynosi

$$U_S = U_B - (R_i + L \frac{di}{dt}) \quad (20)$$

Różniczkując równanie (19), otrzymuje się z kolei

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + (R + r) \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0 \quad (21)$$

przy czym równaniem charakterystycznym zależności (21) jest

$$L \lambda^2 + (R + r) \lambda + \frac{1}{C} = 0 \quad (22)$$

a jego rozwiązaniem są pierwiastki

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R+r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R+r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (23)$$

które po podstawieniu

$$\alpha = \frac{R+r}{2L} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

przyjmują postać

$$\lambda_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (24)$$

Zależnie od wartości wyróżnika otrzymuje się więc trzy rozwiązania ogólne równania (21):

- 1) Pierwiastki równania charakterystycznego są rzeczywiste ($\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$)

W tym przypadku rozwiązaniem ogólnym równania (21) jest

$$i = F_1 e^{\lambda_1 t} + F_2 e^{\lambda_2 t} \quad (25)$$

Po znalezieniu stałych F_1 i F_2 z warunków granicznych oraz wstawieniu wartości i z równania (25) do równania (20) otrzymuje się spadek napięcia na otwierającym się zestyku, wyrażony również przez funkcje wykładnicze rzeczywiste

$$U_s = U_B - \frac{U_B}{R} \left[\left(\frac{\lambda_2(R+L\lambda_1)}{R(\lambda_2 - \lambda_1)} \right) e^{\lambda_1 t} - \left(\frac{\lambda_1(R+L\lambda_2)}{R(\lambda_2 - \lambda_1)} \right) e^{\lambda_2 t} \right] \quad (26)$$

2) Równanie charakterystyczne ma jeden podwójny pierwiastek ($\alpha^2 - \omega_0^2 = 0$).

W tym przypadku

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = -\frac{R+r}{2L} = -\alpha \quad (27)$$

a rozwiązaniem ogólnym równania (21) jest

$$i = (At + B)e^{\lambda t} = (At + B)e^{-\alpha t} \quad (28)$$

Po znalezieniu stałych A i B z warunków granicznych oraz wstawieniu wartości i z równania (28) do równania (20) otrzymuje się spadek napięcia na otwierającym się zestyku

$$U_s = U_B + \frac{U_B}{R} \left[(R-\alpha)t - (R-\alpha+1) \right] e^{-\alpha t} \quad (29)$$

3) Pierwiastki równania charakterystycznego są zespolone ($\alpha^2 - \omega_0^2 < 0$), o postaci

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R+r}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R+r}{2L}\right)^2} \quad (30)$$

lub

$$\lambda_{1,2} = -\alpha \pm j \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (31)$$

Rozwiązaniem ogólnym równania (21) w tym przypadku jest

$$i = (D_1 \cos \omega t + D_2 \sin \omega t) e^{-\alpha t} \quad (32)$$

lub w dogodniejszej postaci

$$i = K \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (33)$$

gdzie $D_1 = K \sin \varphi$ $D_2 = K \cos \varphi$

Spadek napięcia na otwierającym się zestyku otrzymuje się po znalezieniu stałych K i φ oraz podstawieniu wartości prądu z równania (33) do równania (20), przy czym spadek napięcia na otwierającym się zestyku R.Holm podaje w tym przypadku w następującej postaci [15]:

$$U_s = U_B + \frac{U_B r}{R \omega} \left(\frac{1}{Cr} - \frac{R}{L} \right) e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (34)$$

gdzie

$$\sin \varphi = \frac{\omega LC(R-r)}{L-CRr}, \quad \cos \varphi = \frac{L - \frac{C}{2}(R^2+r^2)}{L-CRr} \quad (35)$$

Natomiast wartość maksymalna pierwszego maksimum tych tłumionych oscylacji wynosi [3, 15]

$$U_{sm} = U_B \left(1 + \frac{L-CRr}{R\sqrt{LC}} \cdot e^{-\alpha t_m} \right) \quad (36)$$

przy czym czas t_m tego maksimum wyraża się z dostateczną dokładnością zależnością

$$t_m \approx \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{\omega} + \frac{R-r}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \right) \quad (37)$$

Maksimum napięcia występuje w przybliżeniu przy $t = \frac{T}{4}$ i przemieszcza się w kierunku $\frac{T}{2}$ ze wzrostem C , lecz w praktyce można przyjąć z dostateczną dokładnością, że $t_m = \frac{T}{4}$ [13, 26]. Czas pełnego otwarcia zestyku powinien być więc mniejszy niż t_m .

W przypadku układu gaszącego RC dołączonego równolegle do cewki przekąźnika równanie napięć przyjmuje postać

$$L \frac{di}{dt} + (R+r) i + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (38)$$

Rozwiązanie tego równania jest identyczne z rozwiązaniem równania (19), a rozważania i zależności dotyczące układu z gasikiem równoległym do zestyku są więc słuszne także w przypadku gasika równoległego do cewki przekąźnika.

W układach gasikowych z przekąźnikami mamy do czynienia na ogół z przebiegiem napięcia o charakterze oscylacji tłumionych [3, 13, 29]. W przeszłości dość szeroko

były rozpowszechnione jednak układy gasikowe uwzględniające przypadek przebiegu krytycznego (wyróżnik równania charakterystycznego równy zero) przy zalecanych wartościach $R = r$, o czym wspomina M.A. Razumihin [29].

Znając charakterystykę drogi w funkcji czasu rozdzielających się styczek oraz charakterystykę napięcia zapłonu wyładowania w danym gazie (powietrzu) w funkcji odległości elektrod, można otrzymać przez przeliczenie charakterystykę napięcia zapłonu w funkcji czasu. Układ gaszący musi być zaś tak dobrany, żeby krzywa napięcia w otwierającym się zestyku przebiegała zawsze poniżej tej charakterystyki zapłonu, przy czym na ogół wystarcza znajomość części przebiegu napięcia od $t = 0$ do pierwszego maksimum.

M.A. Razumihin [29] podaje przebieg napięcia na otwierającym się zestyku w przypadku tłumionych oscylacji nieco w innej postaci, a mianowicie w postaci

$$U_s = U_B + IR \frac{2k-1-k^2 p^2}{k \sqrt{p^2-1}} e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (39)$$

w której

$$\frac{r+R}{2R} = k \quad \frac{L}{kR} = \tau \quad \frac{1}{kR} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = p \quad I \approx \frac{U_B}{R+r}$$

a

$$\varphi = \arctg \frac{2k \sqrt{p^2-1} \cdot (k-1)}{k^2 p^2 - 2k^2 + 2k - 1} \quad (40)$$

Czas t_m , po upływie którego U_s przyjmuje wartość maksymalną $U_{s,m}$, wynosi natomiast

$$t_m = \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{p^2 - 1} - \varphi}{p^2 - 1} \cdot \tau \quad (41)$$

Oznaczając szybkość rozwierania zestyku przez ν oraz maksymalną długość mostka przed wyparowaniem przez S , można napisać, że szczelina między stycznymi, przy której $U_s = U_{s,m}$, wynosi

$$S_{k \max} = \nu \cdot \tau S_m + S \quad (42)$$

gdzie $S_m = \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{p^2 - 1} - \varphi}{p^2 - 1}$

Przez podstawienie t_m z zależności (41) do zależności (39) otrzymuje się, że

$$U_{s,m} = U_{B+L.R} \frac{k^2 p^2 - 2k + 1}{k \sqrt{p^2 - 1}} \cdot e^{-S_m} \cdot \sin \operatorname{arctg} \sqrt{p^2 - 1} \quad (43)$$

4.2.3. Przebieg napięcia w otwierającym się zestyku przy obciążeniu przekaźnikiem [3, 20]

W cewce powietrznej strumień magnetyczny ϕ tak zwiększa się liniowo ze wzrostem prądu, że $n \frac{d\phi}{di} = n \frac{\phi}{i}$ jest wartością stałą, nazywaną indukcyjnością L cewki. Jeśli wobec tego w przypadku przekaźnika (cewka z rdzeniem stalowym) określi się $L^*(i) = n \frac{d\phi}{di}$ jako postać różniczkową indukcyjności, wtenczas do równania (19) można wprowadzić formalnie wartość

$$U_L = L^*(i) \frac{di}{dt} \quad (44)$$

jednak ściśle rozwiązanie równania różniczkowego (19) nie jest możliwe [3].

Dalsza analiza będzie przeprowadzona dla konkretnego przypadku przekąźnika płaskiego o liczbie zwojów 14000, rezystancji $R = 1000 \Omega$ i szczelinie $0,1 \text{ mm}$ [3]. Pomiarzy strumienia magnetycznego cewki tego przekąźnika z przyciągniętą kotwicą w funkcji prądu, zmniejszanego od stanu nasycenia (60 mA), przedstawiono na rys. 26, z którego widać, że strumień magnetyczny najpierw łagodnie maleje do wartości prądu około 7 mA, po czym z kolei spadek jego jest raptowny. Na tym samym rysunku wykreślono wyznaczoną graficznie krzywą postaci różniczkowej indukcyjności $L^*(i) = n \frac{d\phi}{di}$, z której widać, że L^* wzrasta od wartości 2 H przy 60 mA do 120 H przy 7 mA (zachowując dalej tę wartość aż do przejścia prądu przez zero). Do celów praktycznych można jednak podzielić krzywą strumienia na dwa odcinki, z których jeden byłby w przybliżeniu linią prostą w zakresie nasycenia, a drugi linią prostą w zakresie stromego opadania, otrzymując w ten sposób dwie wartości indukcyjności L_n i L_o oraz następujące wartości napięcia U_L :

$$L^* = L_n = 3 \text{ H w zakresie } 7 \text{ mA} < i < 60 \text{ mA}$$

$$U_L = L^* \frac{di}{dt} \text{ przy}$$

$$L^* = L_o = 120 \text{ H w zakresie } 0 \text{ mA} < i < 7 \text{ mA}$$

Obliczone z tych wartości napięcie w otwierającym

się zestyku będzie początkowo wzrastać stromo (określone przez $L_n = 3 \text{ H}$), a następnie, po zmniejszeniu się prądu całkowitego do wartości 7 mA, powoli (określone teraz przez $L_0 = 120 \text{ H}$).

Wskutek wprowadzonych przybliżeń, powyższe obliczenia obarczone są błędem trudnym do ujęcia i dlatego nie są dokładne. Jeśli jednak przebieg tak obliczonego napięcia znajduje się dostatecznie nisko pod charakterystyką zapłonu, można je stosować do wyznaczania wartości R i C gasika.

W celu porównania przedstawiono na rys. 27 i 28 oscylogramy napięć i prądów w otwierającym się zestyku obciążonym cewką powietrzną i przekąźnikiem. Z porównania tego widać, że napięcie przy obciążeniu przekąźnikiem zanika prawie aperiodycznie do wartości napięcia baterii, podczas gdy w przypadku cewki powietrznej widoczne są wyraźne oscylacje. Maksimum tego napięcia występuje w przypadku przekąźnika dużo później i ma nieco większą wartość niż w przypadku cewki powietrznej.

4.2.4. Analityczne wyznaczanie elementów gasika

4.2.4.1. Rezystancja gasika. Przy wyznaczaniu wartości rezystancji gasika występują dwie sprzeczne tendencje.

Z jednej strony rezystancja gasika powinna być jak najmniejsza, a nawet równa zero, ponieważ rezystancja ta ma wpływ na wartość napięcia na zestyku w momencie jego otwierania, która powinna być jak najmniejsza, że-

by nie dopuścić do utworzenia krótkiego łuku. Rezystancja ta nie powinna być za duża także z uwagi na niebezpieczeństwo zwiększania czasu zwalniania przekaźnika, będącego obciążeniem zabezpieczanego zestyku.

Z drugiej strony rezystancja gasika powinna być możliwie duża, ponieważ ogranicza ona prąd ładowania lub rozładowania kondensatora (zależnie od wybranego układu) podczas zamykania zestyku. Za duży prąd może bowiem powodować nadmierny wzrost temperatury styceń i ich nagrzewanie, a także zwiększone zużycie wskutek występowania iskrzenia.

W przeważającej większości przyjmowane jest założenie równości rezystancji r i rezystancji obciążenia R

$$r = R \quad (45)$$

jakkolwiek niekiedy przyjmuje się również taką wartość rezystancji r , aby prąd płynący przez zabezpieczany zestyk nie przekroczył maksymalnej wartości dopuszczalnej dla danego zestyku. Tak więc przyjmuje się niekiedy, że

$$r = \frac{U_B}{I_{\max}} \quad (46)$$

Przy założeniu $r = R$ napięcie na zestyku w pierwszej chwili jego otwierania jest równe napięciu baterii zasilającej $U_g = U_B$, którego nie powinno się przekraczać, wobec czego wartość R powinna być górną granicą wartości rezystancji r . Ponieważ zaś nie można dopuścić także do przekroczenia dopuszczalnego prądu zestyku I_{\max} , dolną granicą wartości rezystancji r powinna być wartość $r =$

$$= \frac{U_B}{I_{\max}}.$$

Uwzględniając to, można przyjąć, że rezystancja r gasika powinna zawierać się w przedziale:

$$\frac{U_B}{I_{\max}} \leq r \leq R \quad (47)$$

4.2.4.2. Pojemność kondensatora [15, 26]. Według A. Piątkowskiego [26] który analizował metody obliczania pojemności gasika podane w literaturze technicznej, wartość pojemności ustalona przez Burstyna ($C = \frac{II}{U_p}$, gdzie $U_p = 300 \text{ V}$) jest za mała w porównaniu z wartością ustaloną innymi metodami i powoduje występowanie znacznie większego napięcia na zestyku niż w wyniku obliczeń innymi metodami. Natomiast metody proponowane przez Hebla i Vollmeyera oraz przez Strnada ($C = \frac{L}{2R}$) przyjmują rezystancję gasika $r = R$ (podobnie jak Burstyn), co prowadzi do wydłużania czasu zwalniania przekaźnika, będącego obciążeniem zabezpieczanego zestyku.

W celu bardziej prawidłowego ustalenia pojemności A. Piątkowski rozważa odcinek charakterystyki napięcia na otwierającym się zestyku $U_s = f(t)$ w przedziale $t = 0$ do $t = \frac{1}{4} T$, gdzie T jest okresem powstałych oscylacji i przedstawia go za pomocą przebiegu aproksymowanego, zbliżonego do rzeczywistego i możliwie dogodnego do analizy:

$$U_s = Ir + B \sin \frac{t}{Cr \sqrt{\beta}} \quad (48)$$

w którym

$$B = I \left[R - r + r \sqrt{\beta} \cdot \exp \left(- \frac{\pi (R+r)}{4r \sqrt{\beta}} \right) \right] \text{ oraz } \beta = \frac{L}{r^2 C}$$

Przyjmując wartość $r = \frac{R}{3}$, otrzymuje on z kolei

$$U_s = I r \left\{ 1 + \left[2 + \sqrt{\beta} \cdot \exp \left(- \frac{\pi}{\sqrt{\beta}} \right) \right] \cdot \sin \frac{t}{Cr\sqrt{\beta}} \right\} \quad (49)$$

Przebiegi napięcia u_s na otwierającym się zestyku dla różnych β i odcinków charakterystyk większych niż $\frac{T}{4}$, a także dla trzech wartości r ($r = \frac{R}{3}$, $r = R$, $r = 3R$) przedstawiono na rys. 29 [15]. Przebiegi na rys. 29'a i b odpowiadają najczęściej spotykanym przypadkom $r < R$, a rys. 29 d szczególnie przypadek $r = R$.

W dalszym ciągu A. Piątkowski przyjmuje dla napięcia przebicia współczynnik bezpieczeństwa 0,5 (przyjmowanie współczynnika bezpieczeństwa zaleca także M.A. Razumihin [29] i tak dobiera maksymalną wartość β , żeby napięcie maksymalne odczytane z wykresu nie przekroczyło wartości $0,5 U_p$ (dla powietrza $0,5 U_p = 150 \text{ V}$). Ponieważ zaś maksymalne napięcia zasilania w urządzeniach telekomutacyjnych nie przekraczają 60 V, wobec tego

$$\beta_{60} \approx 50,$$

$$\text{a ponieważ } \beta = \frac{L}{r^2 C}, \text{ to } \frac{L}{r^2 C} < 50$$

czyli

$$C > \frac{L}{50r^2} \quad (50)$$

Po ustaleniu określonej wartości C należy jeszcze sprawdzić, czy przebieg napięcia na otwierającym się zestyku znajduje się poniżej krzywej zapłonu wyładowania świetlącego, uwzględniając uwagi zamieszczone w 4.1 odnośnie wpływu szybkości otwierania zestyku na przebieg krzywej zapłonu.

W porównaniu z powyższymi obliczenia wartości elementów gasika według metody podanej przez M.A. Razumihina [29] są bardziej skomplikowane i wykorzystują uprzednio sporządzone wykresy parametrów pomocniczych. Poza tym z podanego przez Razumihina przykładu wynika, że może być $r > R$, co nie jest zgodne z ustaleniami A. Piątkowskiego [26].

4.2.5. Uproszczone sposoby obliczania elementów gasika RC

W literaturze technicznej podawane są także różne uproszczone sposoby obliczania elementów gasika RC.

I tak E. Pommering [27] określa minimalny opór opronika jako

$$r = \frac{U_B}{I_m} \quad (51)$$

gdzie U_B - napięcie baterii zasilającej, a I_m - natężenie prądu łuku dla czystych styczek. Natomiast pojemność kondensatora powinna być taka, aby uniemożliwiała ona wzrost napięcia w otwierającym się zestyku powyżej 280 V oraz była możliwie mała w celu uniknięcia zgrzewania elementów stykowych podczas zamykania obwodu.

L.T.I. Clement [8] podaje następujący wzór empiryczny na pojemność kondensatora:

$$C = \frac{I^2}{10} \quad [\mu F] \quad (52)$$

w którym I oznacza prąd ustalony obwodu przy zamkniętym zestyku. Wzór na opór opornika gasika, podany przez niego, jest zaś następujący:

$$r = \frac{U_B}{10 I} \alpha \quad [\Omega] \quad (53)$$

gdzie $\alpha = 1 + \frac{50}{U_B}$.

Wartość C nie powinna być przy tym mniejsza niż 0,001 μF , a wartość r mniejsza niż 0,5 Ω .

W.L. Scott [32] przyjmuje, powołując się na doświadczenia wielu badaczy, że jeśli szybkość otwierania zestyku nie jest anormalnie mała, to minimalną wartość pojemności kondensatora w mikrofaradach można wtedy przyjmując jako równą wartości prądu ustalonego obwodu w amperach, co potwierdza również H. Kunath [22]. Wartość rezystancji opornika powinna być natomiast dostatecznie mała w celu całkowitego wygaszenia łuku i jednocześnie dostatecznie duża w celu uniknięcia nadmiernego prądu zamykania zestyku. Ponadto W.L. Scott stwierdza, że dla większości zastosowań wartości C i r nie są krytyczne, co oznacza, iż optimum gaszenia znajduje się w szerokim zakresie ich wartości.

H. Fuhrmann [13] podaje zaś następujący wzór na opór opornika:

$$r = \frac{U_B}{I_k} \quad (54)$$

w którym I_k jest dopuszczalnym prądem zestyku. Natomiast wartość pojemności kondensatora ustala on zależnie od czasu otwierania zestyku T' , który powinien być mniejszy niż $\frac{T}{4}$. Stąd wynika T , a więc i ω ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), wobec czego można łatwo obliczyć pojemność z zależności

$$C = \frac{1}{L(\omega^2 + \alpha^2)} \quad (55)$$

w której $\alpha = \frac{R}{2L}$.

Obliczone wartości należy jeszcze podstawić do wzoru na maksymalną wartość napięcia zestyku i sprawdzić, czy nie przekracza ona dopuszczalnej wartości.

N.P. Truskałow [36] określa wreszcie wielkość pojemności (z uwzględnieniem wydłużenia czasu zwalniania przekaźnika) z zależności

$$C = \frac{(t_{ot} \xi^2)}{L \left(\ln \frac{I'}{i_{ot}} \right)^2} \quad (56)$$

w której

t_{ot} - określony czas zwalniania przekaźnika,

ξ - dopuszczalny wzrost czasu zwalniania w procentach,

i_{ot} - prąd zwalniania.

4.2.6. Graficzne metody wyznaczania parametrów gasika RC

Katalog przekaźników firmy Siemens [45] oraz H. Kunath [22] podają nomogram do wyznaczania pojemności gasika RC, przedstawiony na rys. 30, w którym przyjęto następujące założenia:

$$\frac{r}{R} \leq \frac{U_m}{U_B}, \quad \frac{r}{R} \leq 1, \quad U_{s,m} \leq U_p \leq 300 \text{ V}$$

gdzie

- U_m - napięcie graniczne łuku,
- $U_{s,m}$ - napięcie maksymalne na zestyku,
- U_p - napięcie przebicia.

W celu wyjaśnienia posługiwania się nomogramem rozpatrzmy przykład obwodu podanego w katalogu firmy Siemens, którego dane są następujące:

$$L = 1,5 \text{ H}; \quad R = 3000 \Omega; \quad U_B = 60 \text{ V} \quad (I = 20 \text{ mA});$$

materiał stykowy - srebro.

Ponieważ przy $I = 20 \text{ mA}$ stosunek $\frac{U_m}{U_B} > 1$, do obliczenia r uwzględnia się warunek $\frac{r}{R} \leq 1$. I tak przyjmując na przykład $\frac{r}{R} = \frac{2}{3} = 0,67$, otrzymuje się, że $r = 2000 \Omega$.

W celu obliczenia pojemności przyjmuje się, że na zestyku nie powinno wystąpić przepięcie, oraz że stosunek $\frac{U_s}{U_B}$ powinien być równy jedności. Wobec tego prowadzi się prostą przez punkt $L = 1,5 \text{ H}$ i $R = 3000 \Omega$, która przecina skalę pomocniczą w punkcie 17,6 mm. Punkt

ten łączy się następnie z punktem $\frac{R}{R} = 0,67$ na skali $\frac{U}{U_B} = 1$, otrzymując w punkcie przecięcia tej prostej ze skalą C wartość pojemności $0,25 \mu\text{F}$.

Najwyższa dopuszczalna wartość $\frac{U_S}{U_B}$ powinna wynosić $\frac{300}{60} = 5$. W tym przypadku, dla tego samego r , otrzymuje się $C = 0,006 \mu\text{F}$.

Ciekawą i dość dokładną metodę graficznego określania parametrów gasika RC opracował N.P. Truskałow, według którego należy znać charakterystykę czasową napięcia w otwierającym się zestyku $U_S(t)$ [38]. Metoda ta jest jednak dość skomplikowana i dlatego nie będzie omówiona w niniejszym opracowaniu.

4.2.7. Metody empiryczne wyznaczania parametrów gasika RC

Wartości elementów gasika RC można wyznaczyć bezpośrednio podczas pracy układu, na przykład przez obserwację przebiegu napięcia U_S na oscyloskopie [3, 43]. I tak podczas gdy przy otwieraniu obwodu niezabezpieczonego gasikiem napięcie na zestyku po bardzo krótkim impulsie zapłonu osiąga wartość napięcia wyładowań świetlających (ok. 300 V) i następnie zmienia się odpowiednio do wzrastającej szczeliny, to przy prawidłowo dobranym gasiku, po raptownym skoku do wartości I.r woltów wzrasta ono dalej stopniowo do maksymalnej wartości (poniżej 300 V) i następnie (ewentualnie po kilku oscylacjach, zależnie od parametrów obwodu) kończy się na wartości napięcia baterii. Tak więc jeśli na przykład war-

tość kondensatora zostanie wybrana za mała, podczas wzrastania napięcia do pierwszego maksimum wystąpią przebiccia. Zaoszczędza się przy tym oddzielnego wyznaczenia charakterystyki zapłonu, ponieważ charakter wyładowania można dokładnie i łatwo rozpoznać na przebiegu napięcia na oscyloskopie.

A. Piątkowski podaje inną opracowaną przez siebie empiryczną metodę wyznaczania gasika, która polega na tym, że pojemność gasika powinna być tak dobrana, aby układ gaszący nie powodował zmiany czasu t_z zwalniania przekaźnika, będącego obciążeniem zabezpieczanego zestyku. Wartość pojemności C według tej metody wyznacza przecięcie zależności $t_z = f(C)$, będącej linią prostą przy $r = \text{const}$, oraz zależności $t_z = t_{z0}$, w której t_{z0} jest czasem zwalniania przekaźnika bez układu gasikowego, przy czym t_z staje się mniejsze niż t_{z0} , gdy pojemność jest mała oraz zwłaszcza gdy $r < 0,7 R$.

W metodzie tej praktycznie należy wykonać trzy pomiary czasów zwalniania przekaźnika, a mianowicie jeden pomiar bez gasika (wyznaczenie $t_z = t_{z0}$) oraz dwa pomiary z gasikiem o uprzednio wybranej rezystancji r przy dwóch różnych pojemnościach C /wyznaczenie $t_z = f(C)$ /.

Powyższe trzy pomiary wystarczają do wykreślenia dwóch prostych, których punkt przecięcia nas interesuje.

Na rys. 31 pokazano przykładowo proste dla obciążenia zestyku, będącego przekaźnikiem płaskim o oporze 250Ω i 6900 zwojach oraz napięcia zasilania 24 V.

4.3. Układ gaszący rezystorowy, linearny [8, 22, 29, 32, 48]

Gasik rezystorowy może być przyłączony równolegle do zabezpieczonego zestyku lub do jego obciążenia (rys.32).

W przypadku przyłączenia równoległego gasika do zestyku równanie obwodu będzie miało następującą postać [48]:

$$L \frac{di}{dt} + (R + r) i = U_B \quad (57)$$

a

$$U_s = ri \quad (58)$$

Ponieważ jednak z warunków początkowych wynika, że przy $t = 0$ $i = \frac{U_B}{R} = I$, rozwiązując równanie (57) i podstawiając wartość prądu i do zależności (58), otrzymuje się, iż

$$U_s = \frac{U_B r}{R+r} \left[1 + \frac{r}{R} \exp \left(- \frac{R+r}{L} t \right) \right] \quad (59)$$

wobec czego maksymalne napięcie na zestyku wynosi w pierwszym momencie po jego otwarciu ($t = 0^+$)

$$U_{s,m} \approx \frac{r}{R} \cdot U_B \quad (60)$$

Ponieważ zaś napięcie to powinno być mniejsze niż napięcie przebicia U_p , r powinien wobec tego wynosić

$$r < \frac{U_p}{U_B} R \quad (61)$$

i aby przekaźnik mógł zwolnić, powinien być jednocześnie nie mniejszy niż

$$r \geq \frac{1-K_z}{K_z} k \cdot R \quad (62)$$

jeżeli

K_z - współczynnik zwalniania,

k - współczynnik bezpieczeństwa zwalniania.

W przypadku równoległego przyłączenia gasika do obciążenia równanie obwodu przyjmuje postać [48]:

$$L \frac{di}{dt} + (R + r) i = 0 \quad (63)$$

$$U_s = U_B + ri \quad (64)$$

skąd wartość napięcia na otwierającym się zestyku będzie wynosić:

$$U_s = U_B \left[1 + \frac{r}{R} \cdot \exp \left(- \frac{R+r}{L} t \right) \right] \quad (65)$$

Napięcie to osiąga wartość maksymalną w chwili $t = 0^+$ i wynosi w przybliżeniu

$$U_{s,m} \approx U_B \left(1 + \frac{r}{R} \right) \quad (66)$$

wobec czego r powinien spełniać nierówność:

$$r < \left(\frac{U_P}{U_B} - 1 \right) R \quad (67)$$

Wartość rezystancji gasika często przyjmuje się przy tym trzykrotnie większą od wartości rezystancji cewki przekaźnika [22].

Z powyższych zależności widać, że $U_{s,m}$ nie zależy od indukcyjności obciążenia, co upraszcza zagadnienie obliczenia gasika.

Stosowanie tego rodzaju gasika stanowi dodatkowe obciążenie dla źródła prądu oraz wpływa na zwiększenie czasu zwalniania przekaźnika, który jest uruchamiany zabezpieczonym przez gasik zestykiem.

4.4. Układ gaszący rezystorowy, nieliniarny, symetryczny (warystor) [7, 8, 22, 29, 32, 47, 48]

Nieliniarny, symetryczny, półprzewodnikowy opornik, którego wielkość rezystancji nie zależy od kierunku prądu (nazywany warystorem), charakteryzuje się nieliniarnością charakterystyki napięciowo-prądowej. Podstawowym jego materiałem jest węgiel krzemu, który odznacza się właściwością gwałtownego zmniejszania się rezystancji ze wzrostem napięcia.

Charakterystyka napięciowo-prądowa warystorów ma następującą postać:

$$U = U_0 i^\beta \quad (68)$$

a opór warystora wynosi

$$r = U_0 i^{-\alpha} \quad (69)$$

przy czym

U_0 - stała warystora, zależna od jego kształtu i wielkości, równa wartości napięcia przy przepływie prądu 1 A,

α - tangens kąta nachylenia prostej $\lg r = f(\lg i)$ do osi odciętych,

$\beta = (1 - \alpha)$ - wskaźnik nielinearności oporu, równy tangensowi kąta nachylenia prostej $\lg U = f(\lg i)$.

Charakterystykę napięciowo-prądową warystora oraz, w celu porównania, normalnego opornika, obydwie w skali logarytmicznej, przedstawia rys. 33.

Warystor może być przyłączony równolegle do zestyku lub do jego obciążenia. W drugim przypadku (rys. 34) równanie obwodu będzie następujące [29]:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_0 i^\beta = 0 \quad (70)$$

a napięcie na otwierającym się zestyku wyraża się zależnością

$$U_s = U_B - U_0 \left[\frac{U_0 L}{U_B R} - \left(I^\alpha + \frac{U_0 L}{U_B R} \right) \cdot \exp \left(-\frac{R}{L} \alpha t \right) \right]^\alpha \quad (71)$$

w której I jest prądem przepływającym przez obciążenie w chwili $t = 0^-$.

Maksymalne napięcie na otwierającym się zestyku, osiągnięte w momencie rozwierania $t = 0^+$, powinno być przy

tym mniejsze niż napięcie przebicia minimalnej szczeliny między stycznymi, wobec czego powinno ono być następujące [48]:

$$U_{s,m} = U_o I^\beta + U_B < U_p \quad (72)$$

Parametry tego warystora oblicza się zaś z następujących zależności:

$$\beta = \frac{\lg \frac{U_o}{U_p - U_B}}{\lg \frac{R}{U}} \quad (73)$$

$$U_o = (U_p - U) \cdot \left(\frac{R}{U}\right)^\beta \quad (74)$$

W przypadku warystora przyłączonego równolegle do zestyku maksymalne napięcie na otwierającym się zestyku powinno wynosić

$$U_{s,m} = U_o I^\beta < U_p \quad (75)$$

a parametry warystora są następujące:

$$\beta = \frac{\lg \frac{U_p}{U_B}}{\lg \frac{P}{P_{w1}}} \quad (76)$$

$$U_o = U_p \left(\frac{R}{U_B}\right)^\beta \quad \text{lub} \quad \frac{U_p}{I^\beta} \quad (77)$$

gdzie

P_{w1} - moc wydzielona w uzwojeniu i warystorze przy otwartym zestyku,

P_w - moc wydzielona w warystorze.

H. Kunath podaje [22], że zastosowanie warystora równoległego do zestyku powoduje, iż napięcie na otwierającym się zestyku przekracza maksymalnie 2,7 razy napięcie źródła, podczas gdy w przypadku warystora równoległego do przekaźnika - tylko 1,7 razy.

Wadą stosowania warystorów jest dodatkowa strata mocy na warystorze oraz zwiększenie czasu zwalniania kotwicy przekaźnika, sterowanego zestykiem zabezpieczanym przez warystor.

Własności warystorów z punktu widzenia ich stosowania w układach gaszących są podane przez E.W. Brassa [7].

4.5. Układ gaszący rezystorowy, nieliniarny, niesymetryczny (dioda, prostownik metalowy)

[8, 13, 22, 32, 43, 48]

Diode lub prostownik przyłącza się równolegle do obciążenia zabezpieczanego zestyku w taki sposób, aby przy zamkniętym zestyku dioda była włączona w kierunku zaporowym, z czego wynika, że napięcie wsteczne diody musi być większe niż napięcie baterii. W momencie otwierania zestyku prąd przepływający przez diodę zmienia kierunek, płynąc w kierunku przewodzenia diody, wobec czego dioda stanowi wtedy bardzo mały opór r_p dla przepływającego

prądu i zapewnia rozładowanie energii cewki. Istotne dla wyboru diody jest, aby prąd powstający wskutek przepięcia na cewce nie przekroczył dopuszczalnego prądu szczytowego diody. Prąd ten można ograniczyć również przez włączenie w szereg z diodą opornika r_p , który wykorzystuje się także w celu zmniejszenia czasu zwalniania przekąźnika (rys. 35).

Do poniższych obliczeń przyjęto w przybliżeniu idealną charakterystykę napięciowo-prądową warystora, a więc charakterystykę w postaci linii prostej, czyli $r_p = \text{const}$. Przy takim założeniu równanie obwodu będzie następujące:

$$L \frac{di}{dt} + (R+r_p+r_D) i = 0 \quad (78)$$

a jego rozwiązaniem jest

$$i = \frac{U_B}{R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (79)$$

gdzie

$$\tau = \frac{L}{R+r_p+r_D}$$

Napięcie na otwierającym się zestyku będzie wynosić natomiast

$$U_s = U_B \left[1 + \frac{r_p+r_D}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (80)$$

a jego wartość maksymalna w chwili $t = 0^+$ powinna odpowiadać

$$U_{s,m} = U_B \left(1 + \frac{r_p + r_D}{R} \right) < U_p \quad (81)$$

skąd

$$r_p + r_D < \left(\frac{U_p}{U_B} - 1 \right) R \quad (82)$$

Jeśli nie będzie dodatkowego opornika ($r_D = 0$), na zestyku będzie wtedy maksymalne napięcie, prawie równe napięciu baterii, ponieważ na ogół $r_p \ll R$.

4.6. Odmiany układów podstawowych oraz układy gaszące kombinowane

W zależności od potrzeby stosuje się różne odmiany podstawowych układów gasikowych, jak na przykład specjalny układ gasików RC do zabezpieczania przełącznika, przedstawiony na rys. 36 [45].

Inny układ, a mianowicie dwóch diod (lub prostowników) połączonych przeciwsobnie i przyłączonych równolegle do obciążenia zabezpieczanego zestyku, przedstawia rys. 37. Układ ten działa gasząco wtedy, gdy wartość napięcia indukowanego w cewce przekąźnika przekroczy wartość napięcia wstecznego diody D2, przy czym gaszenie jest w tym układzie mniej skuteczne niż w przypadku pojedynczej diody, lecz za to ograniczone jest opóźniające działanie układu gasikowego na zwalnianie kotwicy przekąźnika [32]. Prostownik lub dioda muszą być w tym przypadku odporne na duże chwilowe prądy wsteczne, co ograniczą ich wybór do prostowników selenowych i diod krzemowych.

Inną odmianą jest tzw. układ Larsena, składający się z kombinacji L i C, przedstawiony na rys. 38 [13, 46].

Znane są także różne układy gasikowe kombinowane, będące ulepszeniem istniejących gasików prostych lub też przeznaczone do szczególnie ciężkich warunków przełączania, w których zwykle układy są niewystarczające. Taki układ przedstawia rys. 39, na którym pokazano układ z rozłożoną pojemnością oraz rys. 40, przedstawiający rozwiązanie alternatywne, stosujące pomocniczy zestyk, który w pierwszym etapie działania powoduje zmniejszenie prądu przez włączenie do obwodu dodatkowego opornika przed ostatecznym otwarciem obwodu [32].

Kombinowany gasik RC, wykorzystujący jednokierunkowe własności przewodzące diody lub prostownika, przedstawia rys. 41. Gasik ten ma bardzo dobre własności gaszące, ponieważ podczas zamykania obwodu, wobec kierunku zaporowego diody, prąd ładowania kondensatora jest ograniczony opornikiem. Natomiast podczas otwierania obwodu dioda zwiiera opornik, wskutek czego skuteczność gaszenia, praktycznie przez sam kondensator, jest zwiększona [27, 32]. Tego rodzaju gasik może działać już przy napięciu wynoszącym 0,6 V na otwierającym się zestyku, wobec czego uniemożliwia on całkowicie wytwarzanie się łuku [27].

Układ gasikowy według patentu angielskiego Nr 957721, przedstawiony na rys. 42, składa się z opornika, kondensatora, diody i cewki indukcyjnej, której zadaniem jest ograniczenie prądu wyładowania z okablowania [32].

Inny patent angielski (Nr 686187) dotyczy układu gaszącego do elektromagnesów mechanizmów napędzanych własnym przerywaczem. Układ ten, przedstawiony na rys. 43, ma cewkę indukcyjną zamiast opornika w gasiku RC i wykorzystuje w ten sposób własności oscylacyjne obwodu LC. Kiedy bowiem zestyk δm otwiera się, prąd płynący przez uzwojenie elektromagnesu jest równy prądowi gasika, lecz przeciwny w fazie, wskutek czego prąd płynący przez zestyk ma wartość bliską zeru. Podobnej konstrukcji gasik, zastosowany w nadajniku dalekopisowym, przedłużył trwałość jego zestyku do 300 milionów zadziałań wobec niecałego miliona w przypadku zwykłego gasika. kondensatorowo-oporowego [32].

Praktyczne przykłady zastosowania różnych gasików podaje R. Führer [46], podczas gdy N.P. Truskałow podaje klasyfikację i krótką charakterystykę kilkudziesięciu różnych układów gasikowych [49].

Obliczenia i badania sprawdzające wartości elementów gasika RC w aparacie telefonicznym przeprowadził zaś S. Karpiński (20).

4.7. Konstrukcja elementów układów gasikowych [6, 7, 11, 18, 23, 25]

Stosunkowo najwcześniej zastosowano zabezpieczanie zestyków za pomocą oporników linearnych, które najpierw wykonywano w postaci zwojów z drutu manganinowego, przyłączonych do uzwojenia przekaźnika. Obecnie używa się do tego celu oporników warstwowych węglowych.

Jako oporniki nieliniarne niesymetryczne używane są diody i prostowniki metalowe, przeważnie selenowe. Diody stosowane w układzie narażonym na duże chwilowe impulsy wsteczne muszą być krzemowe.

W latach 40-tych zastosowano gasik z węglika krzemu (warystor). Pierwsze warystory miały średnicę 15 mm i grubość 6 mm, a ich opór przy 36 V wynosił 70000 Ω i przy 144 V 2000-4000 Ω . Obecnie, na przykład w administracji szwedzkiej, są używane dwa rodzaje oporników z węglika krzemu, a mianowicie jeden dla cewek przekazywników o oporze do 500 Ω i drugi do przekazywników o większym oporze. Obydwa mają średnicę 12,6 mm i grubość 3,8 mm, a ich opory wynoszą, odpowiednio, 10000 Ω i 20000 Ω przy 36 V oraz 520 Ω i 1300 Ω przy 130 V. Dawniej używane były one na ogół bez końcówek i lakierowania, a umieszczano je w specjalnych żłobkach lub niewielkich trzymaczach wyłożonych folią z przylutowanymi końcówkami. Elementy te wyszły jednak już z użycia i obecnie metalowe powierzchnie warystorów mają końcówki z drutu, a cały opornik izoluje się lakierem. Oporniki z węglika krzemu są obecnie najpowszechniej używanymi gasikami.

Kondensatory z szeregowo połączonym opornikiem są od dawna znane jako rodzaj jednego z najbardziej skutecznych gasików, lecz dotychczas były one za drogie i zajmowały dużo miejsca, wobec czego były używane tylko w niektórych przypadkach. Skonstruowanie gasika składającego się z kondensatora zwijkowego i oddzielnego, w szeregu z nim połączonych, opornika (przy czym kondensator i opornik zalewa się razem żywicą epoksydową) spowodowa-

ło jednak, że coraz powszechniej stosuje się obecnie takie właśnie gasiki.

W połowie lat 50-tych pojawiła się nowa konstrukcja gasika RC, wykonanego jako kondensator, w którym rezystancja warstwy metalizowanej papieru kondensatorowego została wykorzystana jako opornik szeregowy. Długość i grubość warstwy metalicznej elektrod kondensatora są przy tym tak obliczone, aby uzyskać wymaganą rezystancję. W ten sposób powstał gasik o rozłożonych parametrach RC, nazywany dalej elementem RC, który ze względu na mniejszy koszt i mniejsze wymiary zaczyna wypierać w wielu przypadkach dotychczasowe układy gasikowe, zestawiane z oddzielnymi opornikami i kondensatorami.

Aby umożliwić przyłączanie tego elementu bezpośrednio do końcówek cewek przekładników, ograniczono jego wymiary, wskutek czego też było konieczne ograniczenie pojemności kondensatora do $0,25 \mu\text{F}$, przy czym opór szeregowy może być w granicach $200 - 600 \Omega$. Element powyższy jest impregnowany wysokotopliwym woskiem i pokryty żywicą poliestrową przez formowanie wtryskowe lub też impregnowany i zalany żywicą epoksydową. Gasiki te mają takie same działanie gaszące jak równoważne im układy z oddzielnymi elementami.

Stosowane są również zabezpieczenia kombinowane, składające się na przykład z kondensatora połączonego w szereg z diodą i opornikiem bocznikującym lub z opornikiem linearnym oraz termistorem lub niewielkiej cewki indukcyjnej.

Jako interesującą innowację można podać ciekawy sposób umocowywania kondensatorów gasikowych, na przykład do obudowy przekaźnika, za pomocą specjalnego kleju [11].

4.8. Porównanie podstawowych układów gasikowych [8, 9, 13, 18, 22, 29, 32, 36, 43]

Porównując efektywność podstawowych układów gasikowych, można stwierdzić, że jakkolwiek opornik linearny jest bardzo tanim elementem gasikowym, nie daje on jednak skutecznego zabezpieczenia. Opornik ten oddziałuje bowiem silnie na czasy zwalniania przekaźników i powoduje pewne straty energii, a ponadto napięcie na zabezpieczanym zestyku osiąga wartość maksymalną w pierwszej chwili rozdzielania się elementów stykowych.

Prostowniki i zwłaszcza nowoczesne diody są bardzo skutecznymi gasikami dzięki ich małemu oporowi w kierunku przewodzenia, jak również wprowadzaniu minimalnych strat. Powodują one jednak tak znaczne opóźnienia zwalniania przekaźników, że właściwie nie nadają się do użycia tam, gdzie zależy na utrzymaniu określonych czasów zwalniania [18].

Warystory bardziej skutecznie niż oporniki linearne ograniczają napięcie na zabezpieczanym zestyku, powodują mniejsze straty energii i znacznie mniej oddziałują na czas zwalniania przekaźników. Natomiast wadą ich jest (podobnie jak diody i prostowniki), że napięcie zestyku osiąga wartość maksymalną w pierwszej chwili przerywania obwodu. Ponadto mają one duże odchyłki rezystan-

cji, co również wpływa na czasy zwalniania przekaźników.

Gasiki RC są najbardziej skutecznymi układami ochronnymi, ponieważ przez odpowiedni dobór ich elementów napięcie na zabezpieczanym zestyku w pierwszej chwili przerywania obwodu może być utrzymane na niskim poziomie, a wartość maksymalna tego napięcia może być tak przesunięta w czasie, że nie wystąpi iskrzenie. Poza tym gasik RC zapewnia w przybliżeniu dwukrotnie większą trwałość niż gasik warystorowy [32]. Wadą tych układów jest znaczny koszt (który w przypadku elementów scalonych RC na pewno ulegnie znacznemu obniżeniu) oraz w pewnym stopniu oddziaływanie opóźniające na czas zwalniania przekaźników, które można jednak ograniczyć, dobierając odpowiednio elementy gasika. Ponadto, ponieważ podczas gaszenia na kondensatorze powstaje dość duże napięcie, pojemność kondensatora (pomijając nawet straty w przybliżeniu równe $I\sqrt{\frac{L}{C}}$) przy dużych prądach i indukcyjnościach musi być znacznie zwiększona w celu ograniczenia napięcia, co ogranicza z kolei stosowanie gasików RC [32].

Porównanie charakterystyk napięciowych w otwierającym się zestyku trzech podstawowych układów gasikowych przedstawiono na rys. 44. Charakterystyka powyższa jest przy tym najbardziej prawidłową i obiektywną oceną układów gasikowych, a układ gaszący jest tym skuteczniejszy, im mniejszy jest kąt nachylenia między styczną do krzywej napięcia (w punkcie $t = 0$) i osią odciętych (oś czasu) oraz czym większy jest czas osiągnięcia maksymalnego napięcia na zestyku [36]. Zmianę charakterystyki napięcia można uzyskać albo przez zmianę samego układu

(rys. 45 a,b) albo przez zmianę parametrów danego układu (rys. 45 c,d,e).

Charakterystykę napięciową należy ponadto porównać z krzywą napięcia zapłonu i sprawdzić, jak przyłączenie gasika wpływa na czas zwalniania przekaźnika.

Interesujące badania porównawcze przeprowadził J. Aizovici [1], który poddał badaniom cztery podstawowe układy gaszące: gasik RC, diodę z opornikiem, warystor i warystor z kondensatorem. Za pomocą prostego układu elektrycznego z oscyloskopem mierzył on maksymalne przepięcie występujące na cewce przekaźnika stanowiącej obciążenie zabezpieczanego zestyku, maksymalny prąd łuku oraz opóźnienie zwalniania przekaźnika, spowodowane wprowadzeniem układu gaszącego. Badanym zestykiem był zestyk hermetyczny, a dane przekaźnika stanowiącego obciążenie zestyku były następujące:

- napięcie zasilania 60 V,
- prąd nominalny 60 mA,
- rezystancja uzwojenia 1000 Ω ,
- indukcja około 4,8 H.

Przepięcie na przekaźniku bez gasika wynosiło około 320 V, a czas wyładowania 2,5 ms, podczas którego przekaźnik był przyciągnięty. Pomiarzy były przeprowadzane przy różnych parametrach układów gaszących.

Porównanie skuteczności układów gaszących zestawiono w tabl. 4 i tabl. 5. W tablicy 4 porównano opóźnienie zwalniania przekaźnika w funkcji przepięcia, a w tablicy 5 przepięcie w funkcji opóźnienia zwalniania.

Wyniki porównania wykazują, co następuje:

- układ dioda-opornik powoduje znaczne zwiększenie czasu zwalniania przekaźnika,
- układ RC jest wyraźnie gorszy niż pozostałe pod względem opóźniania zwalniania przekaźnika (przy mniejszych pojemnościach powstawały oscylacje), lecz zapewnia nieco mniejsze przepięcie,
- sam warystor wydaje się mniej wpływać na czas zwalniania przekaźnika niż układ warystora z kondensatorem, natomiast obydwa układy są równoważne z punktu widzenia przepięć.

Badania przeprowadzone z innymi obciążeniami wykazały, że przy mniejszych prądach przekaźnika układ warystora z kondensatorem jest nieco lepszy od samego warystora.

Na zakończenie niniejszego opracowania należy jeszcze raz podkreślić, że prawidłowe zastosowanie gasika znacznie zwiększa trwałość zabezpieczanych zestyków. I tak, na przykład H. Rensch [30] podaje, że pierwsze uszkodzenie zestyku obciążonego przekaźnikiem płaskim bez układu gasikowego wystąpiło po 5 milionach zadziałań, podczas gdy po zastosowaniu gasika RC uszkodzenia zestyków wystąpiły dopiero po 314 i 680 milionach zadziałań. Badaniom poddano 10 zestyków, przy czym poza wymienionymi pozostałe zestyki osiągnęły 900 milionów zadziałań.

Prawidłowy wybór gasika powoduje również mniejszy

T a b l i c a 4

Opóźnienie zwalniania przekaźnika przez różne układy gaszące

Prze- pięcie (V)	Opóźnienie zwalniania przekaźnika (ms)				
	Wary- stor	Opornik + kondensator	Warystor + kondensator	Dioda + opornik	
220	2,5	5 przy 0,47 μ F	3,2 (3,8) przy 0,47 μ F		10
180	3	5 "	3,1 "		12
160	4	5 "	4 "	1 μ F	14
140	5	5 "	5 "	" "	16
120	7	8 " 1 μ F	7 "	" "	20
100	8	8 "	-	-	21

Przebiegi występujące na otwierającym się zestyku przy użyciu różnych układów gaszących

Opóźnienie zwalniania przekaznika (ms)	Przebiegi (V)			
	Warystor	Opornik + kondensator	Warystor + kondensator	Dioda + opornik
10	-	-	-	200
9	-	-	-	200
8	-	95	-	205
7	-	105	-	210
6	135	120	135 przy 1 μ F	220
5	145	137	145 "	-
4	160	-	160 "	-
3	180	-	200 "	-
2,5	200	-	220 "	-

wzrost oporu zestyku w funkcji liczby jego zadziałań. Charakter i wielkość zmian oporu zestyku zależy od rodzaju i parametrów zastosowanego gasika, przy czym najmniejszy wzrost i zmiany oporu zestyków występują przy użyciu gasików RC oraz kombinowanego układu RC z diodą. Zestyki niezabezpieczone gasikiem wykazują zaś oscylacyjny charakter przebiegu oporu stykowego w funkcji liczby zadziałań [37].

WYKAZ LITERATURY

1. Aizovici J.: La protection des contacts de l'appareillage électromagnétique. Rev. Gen. Électricité 1968, t. 77 nr 2, s. 205-211.
2. Borchert L.: Ursachen der Zerstörung von schwach belasteten Kontakten der Nachrichtentechnik und Kontaktschutz durch eine Funkenüberschlagung. ETZ-A 1957, t. 78 nr 19, s. 702-712.
3. Borchert L.: Über die rechnerische und experimentelle Ermittlung einer Funkenüberschlagung. NTZ 1963, t. 16 nr 6, s. 304-308.
4. Borchert L., Rau K.L.: Die Kenngrößen induktiver Lastkreise für die Bestimmung der Lebensdauer von Kontakten. Arch. elektr. Übertr. 1964, t. 18 nr 1, s. 60-66.
5. Borchert L., Rau K.L., Stocker H.: Einflüsse elektrischer Leitungen auf die Ausschaltvorgänge und

die Lebensdauer bei induktiver Belastung. Frequenz 1967, t. 21 nr 3, s. 95-98.

6. Borgström I.: Die CR-Einheit - ein rationeller Bauteil für den Kontaktschutz. Telefonaktiebolaget L.M. Ericsson and O. Sternbeck, AB RIFA.
7. Brass E.W.: Small silicon-carbide nonlinear resistors: aspects of rating and their application to spark suppression. Electron. Eng. 1968, t. 40 nr 490, s. 660-667.
8. Clement L.T.I.: Reed contact protection. Electron. Compon. 1969 t. 10, nr 12, s. 1462-1464.
9. Dumbauld L.D.: Dry reed switches and switch modules. Control Eng. 1963, t. 10, nr 7, s. 75-106.
10. Eley A.C.: Electronic telephone exchanges. Reed relays for exchange systems. Post Office elect. Eng. 1967, t. 60, cz. 2, s. 140-149.
11. Foulon: Kunststoffkleber in der Elektronik. Elektronik 1968, t. 17 nr 8, s. 238.
12. Frank K.: Funkenlöschung an Kontakten. Radio Fernsehen. 1966, t. 15 nr 7, s. 221.
13. Fuhrmann H.: Die Funkenlöschung bei magnetischen Kontakten und die Berechnung der Funkenlöschglieder. NTZ 1961, t. 14 nr 10, s. 481-486.
14. Habiger E.: Störschutzmittel zur Bedämpfung induktiver Abschaltüberspannung an wechselstrombetätigten Geräten. Elektrie 1969 t. 23 nr 12, s. 522-524.

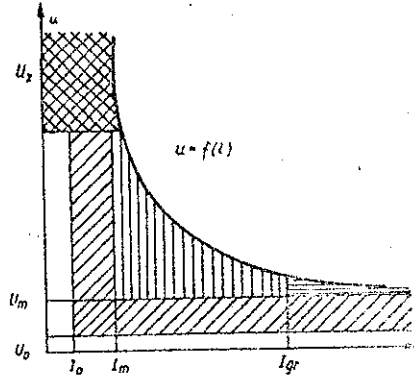
15. Holm R.: Electric contacts. Wyd. 4. Springer Verlag, Berlin 1967.
16. Huber C., Rau K.L.: Thermische Einflüsse der Schaltfolge auf die Lebensdauer des Schutzgaskontaktes bei starker induktiver Belastung. Frequenz 1968, t. 22 nr 1, s. 17-19.
17. Isert H.: Ursachen der Zerstörung von Schutzrohrkontakten beim Schalten induktiver Lastkreise ohne Funkenlöschung. NTZ 1967, t. 20 nr 2, s. 106-110.
18. Jarnbrink E.: Contact protecting circuits. Tele 1965, t. 17 nr 2, s. 240-243.
19. Jenkins R.O.: Contact bounce in dry reed relays. Proc. IEE 1967, t. 114 nr 11, s. 1617-1622.
20. Karpiński S.: Układ gaszący r_g c_g i jego wpływ na pracę przekaźnika impulsującego w obwodach wybierania. Prace OLPiT. Praca nr 34, Warszawa 1967, ss.35.
21. Keil A.: Werkstoffe für elektrische Kontakte. Springer Verlag, Berlin 1960.
22. Kunath H.: Funkenlöschung an Schaltkontakten. Funkschau 1967, t. 39 nr 15, s. 475-477.
23. Leda L.: Kondensator gasikowy - podzespół zabezpieczający styki przed erozją elektryczną. Postępy Telekomunikacji 1968, t. 13 nr 5, s. 14-17.
24. Lohse P., Simon R.W.: "Über das Verhalten von Schutzgaskontakten bei kapazitiver Belastung. NTZ 1969, t. 22 nr 4, s. 225-228.

25. Niewiadomski C.: Zagadnienia materiałów stykowych urządzeń teletechniki łączeniowej. Problemy Łączności 1964, nr 1 (10), s. 1-70, IL.
26. Piątkowski A.: Wpływ indukcyjności na zjawiska stykowe i jego ograniczanie. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska 1964, s. 1-101.
27. Pommering U.A.: A practical guide to contact applications. Narm Relay Symposium Papers 1961, r. 21-26.
28. Rau K.L.: Elektrische Vorgänge im Schutzgaskontakt beim Schalten induktiver Lastkreise. NTZ 1961, t.17 nr 5, s. 242-248.
29. Razumihin M.A.: Erozjonnaja ustojčivost' małomoščnych kontaktov. Energia, Moskwa 1964.
30. Rensch H.: Characteristics and applications of reed contacts. Electr. Communication 1965, t. 40 nr 3, s. 385-397.
31. Schuöcker D.: Zum Mechanismus der unter dem Namen "Schauer" bekannten Gasentladungsphänomens im Schwachstromschalter. Arch. elekt. Übertr. 1968, t. 22 nr 9, s. 443-446.
32. Scott W.L.: Electrical contacts in telephone exchanges: contact opening and closing phenomena and quenching techniques. Part. 1. Contact switching phenomena and quenching techniques. Post Office electr. Eng. J. 1969, t. 61 cz. 4, s. 263-272.

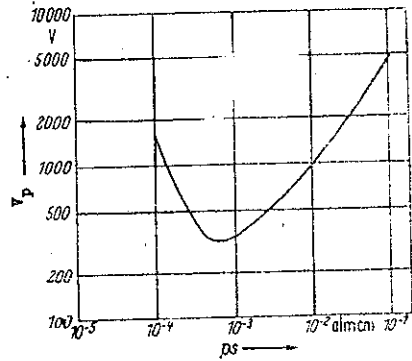
33. Sotskow B.S., Dekabrun I.E., Kriworotowa L.S.: Zagadnienia niezawodności podzespołów elektromechanicznych. Drugi Międzynarodowy Kongres IFAC Szwajcaria, Bazylea 1963, UNITECH Warszawa 1965, s.1-16.
34. Stocker H.: Die Kontaktstelle des Schutzrohrkontaktes und ihr Verhalten bei mechanischen und elektrischen Belastung durch den Schaltvorgang. Fernmelde Ing. 1966, t. 20 nr 11, s. 1-28; nr 12, s. 1-28.
35. Strużak R.G.: Badania rezystancji gasików o rozłożonych parametrach CR. Archiwum Elektrotechniki 1969, t. 18 nr 2, s. 249-267.
36. Truskałow N.P.: Vybór parametrov elementov schem iskrogašenja. Viest. Svjazi 1964, nr 7. s. 6-8.
37. Truskalov N.P.: Vlijanje schem iskrogašenja na perechodnoe soprotivlenje kontaktov. Viest. Svjazi 1966, nr 5, s. 18-20.
38. Truskalov N.P.: Grafičeskij sposob uproščennogo vybora parametrov schem iskrogašenja. Trudy CNIIS KF 1968, nr 1, s. 183-189.
39. Wagar H.N.: Predicting the erosion of switching contacts that break inductive loads. IEEE. Trans. Parts Materials Packaging 1969, t. 5 nr 1, s. 16-24.
40. Praca zbiorowa. Problemy Elektroniki i Telekomunikacji. Źródła zakłóceń. Urządzenia z ruchomymi stykami. Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne i ich zwalczanie. WKiŁ, Warszawa 1968.

41. DIN 41170 Entwurf, Februar 1969: Funk-Entstörkondensatoren. Technische Werte. Elektronorm 1969, nr 4, s. 211.
42. Mills G.W.: The mechanisms of the showering arc. IEEE. Trans. Parts Materials Packaging 1969, t. 5 nr 1, s. 47-55.
43. Kassenberg K., Ruciński J.: Elementy łączeniowe, sygnalizacyjne i zabezpieczające. Tom I. wyd. 2. PWT, Warszawa 1955.
44. Lohse P.: Über den Einfluss der Kontakt - Öffnungsgeschwindigkeit auf die Funkenlöschkennlinie. Frequenz 1970, t. 24, nr 3, s. 84-87.
45. Relais - Datenbuch. Katalog firmy Siemens 1966/67.
46. Führer R.: Wählvermittlungstechnik. Fachverlag Schiele u. Schön, Berlin 1961.
47. Kowitsch G.: Die praktische Anwendung von VDR-Widerständen zur Funkenlöschung. Fernmelde Prax 1962, t. 39 nr 12, s. 521-524.
48. Vitenberg M.I.: Račot elektromagnitnych relé. Enerģia, Moskwa 1966.
49. Truskalov N.P.: Klassifikacija i kratkaja charakteristika električeskich schem iskrogašenja. Viestn. Svjazi 1963, nr 4, s. 8-10.

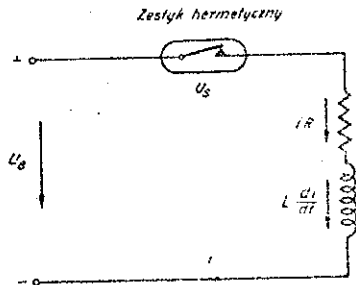
Rys. 1. Charakterystyka napięciowo-prądowa zestyku z podziałem na obszary erozji

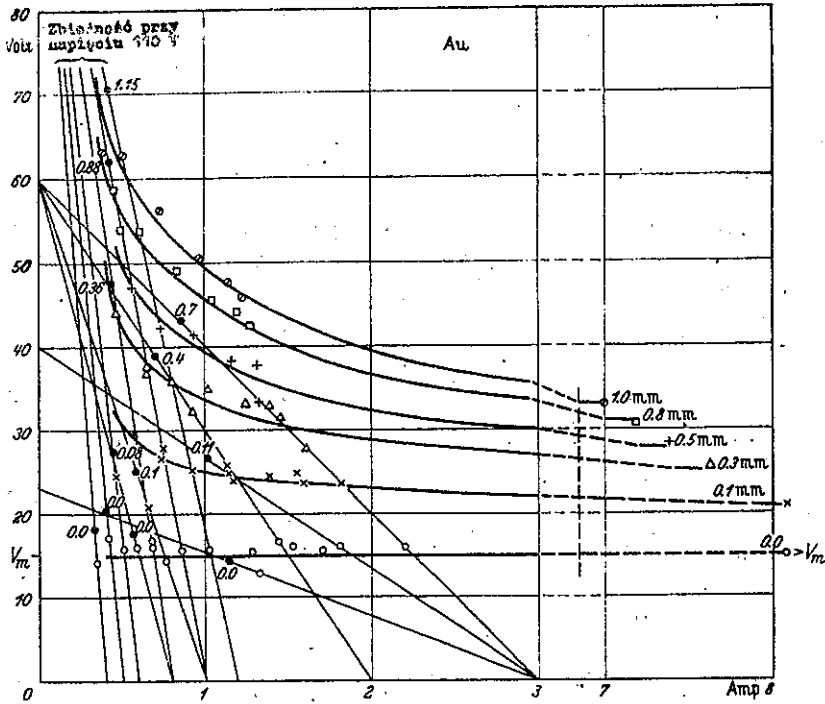


Rys. 2. Wykres napięcia przebicia w szczelinie powietrznej

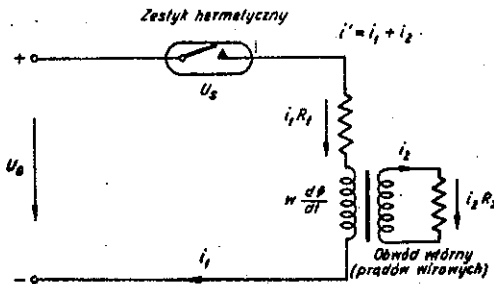


Rys. 4. Schemat obwodu ze stałą indukcyjnością jako obciążeniem zestyku hermetycznego

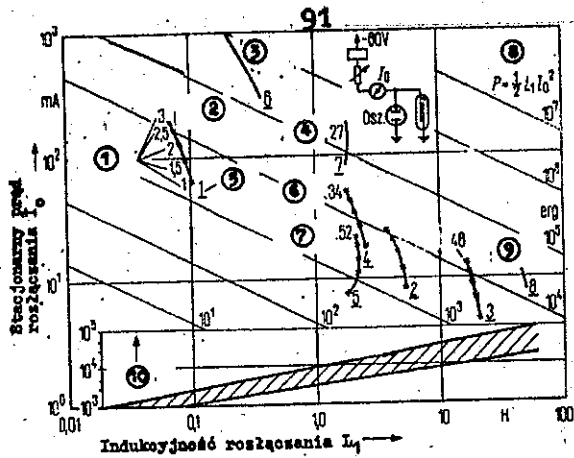




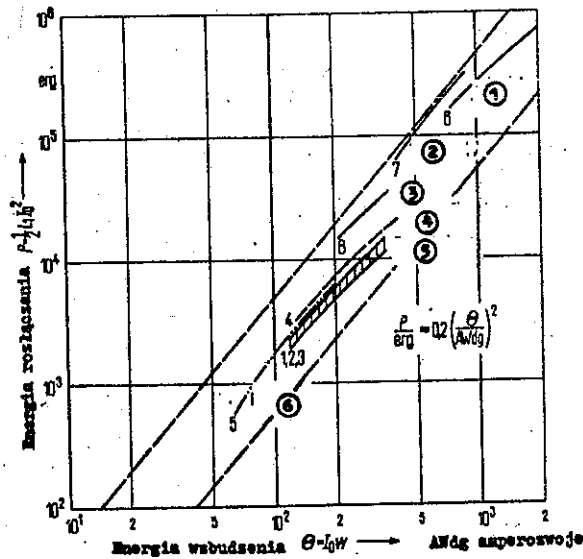
Rys. 3. Rodzina charakterystyk napięciowo-prądowych łuku między elektrodami ze złota.



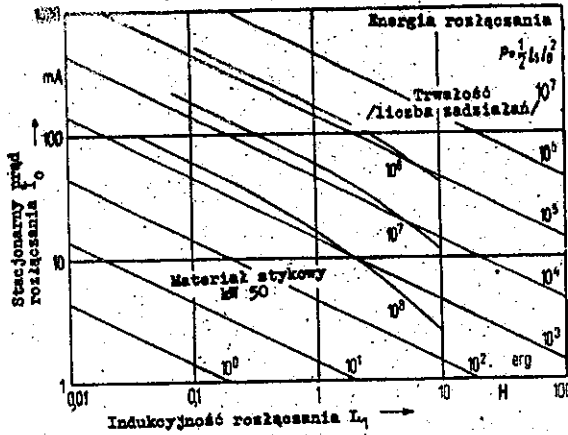
Rys. 5. Schemat obwodu z przekąźnikiem jako obciążeniem zestyku hermetycznego



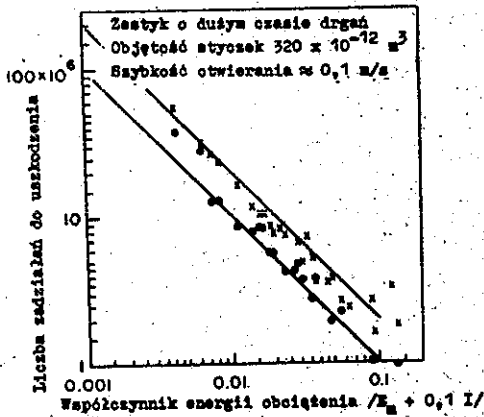
Rys. 6. Wyniki badań podstawowych parametrów elektrycznych różnych, powszechnie stosowanych przekaźników i elektromagnesów
 1 - współczynnik zapasu przyciągania, 2 - przekaźnik płaski 48, 3 - elektromagnes wybieraka podnosząco-obrotowego 27, 4 - elektromagnes wybieraka wstępnego 27, 5 - lp. elementu, 6 - mały przekaźnik okrągły 34, 7 - mały przekaźnik próbn. 52, 8 - energia rozłączenia, 9 - licznik rozmów, 10 - liczba zwojów



Rys. 7. Wykresy energii rozłączenia w funkcji amperozwojów
 1 - elektromagnes wybieraka podnosząco-obrotowego 27, 2 - elektromagnes wybieraka wstępnego 27, 3 - licznik rozmów, 4 - mały przekaźnik okrągły 34, 5 - przekaźnik płaski 48, 6 - mały przekaźnik próbn. 52

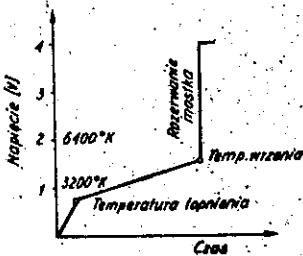


Rys. 8. Trwałość zestyków zwiernych przekaźnika płaskiego typu 48

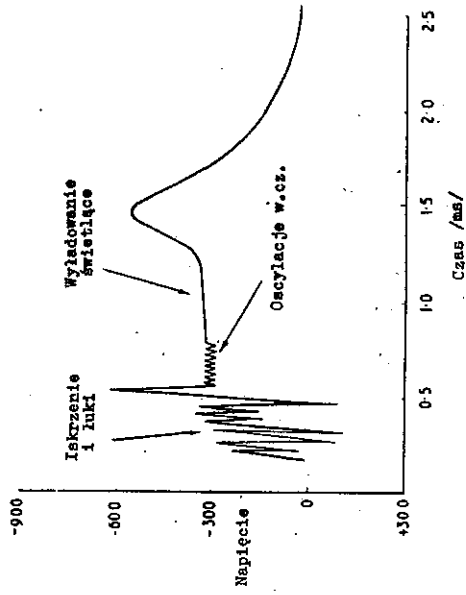


Rys. 9. Trwałość zestyku w zależności od współczynnika energii obciążenia

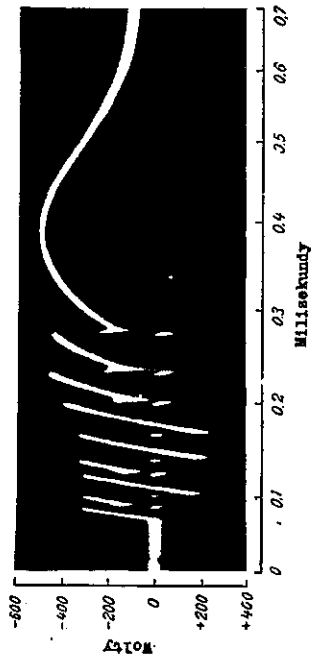
x = długość doprowadzeń około 3 m
 ● = długość doprowadzeń około 20 m



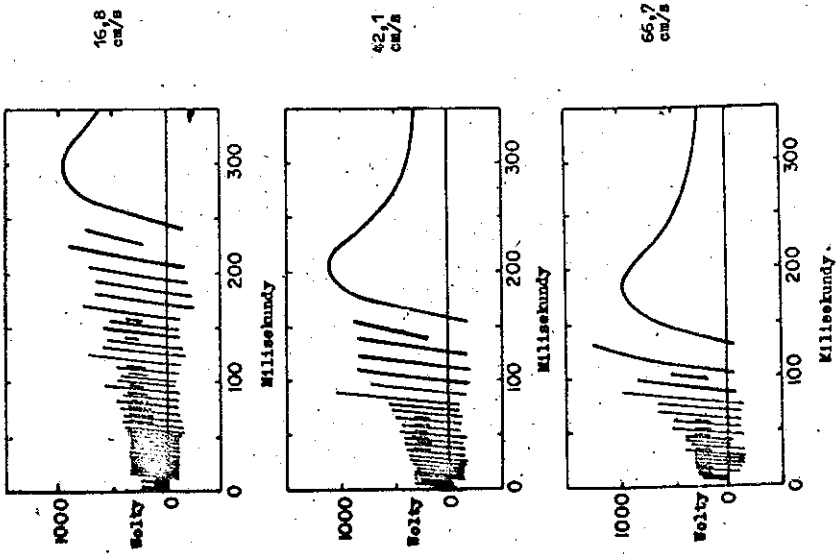
Rys. 10. Spadek napięcia stykowego przy powstawaniu mostka między stykami z palladu



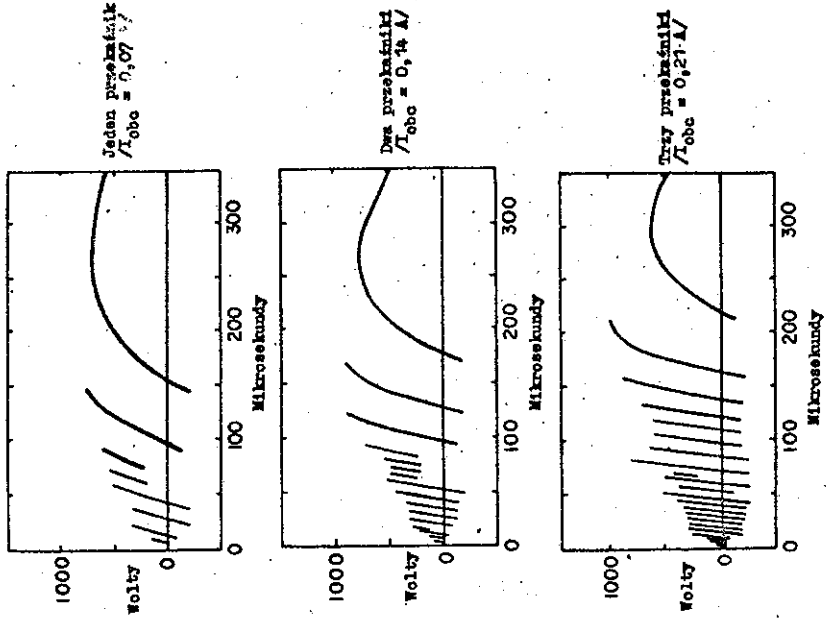
Rys. 12. Przebieg napięcia na otwierającym się zestyku



Rys. 11. Oscylogram wyladowań przejściowych przy otwieraniu zestyku, w obwodzie z przekąźnikiem

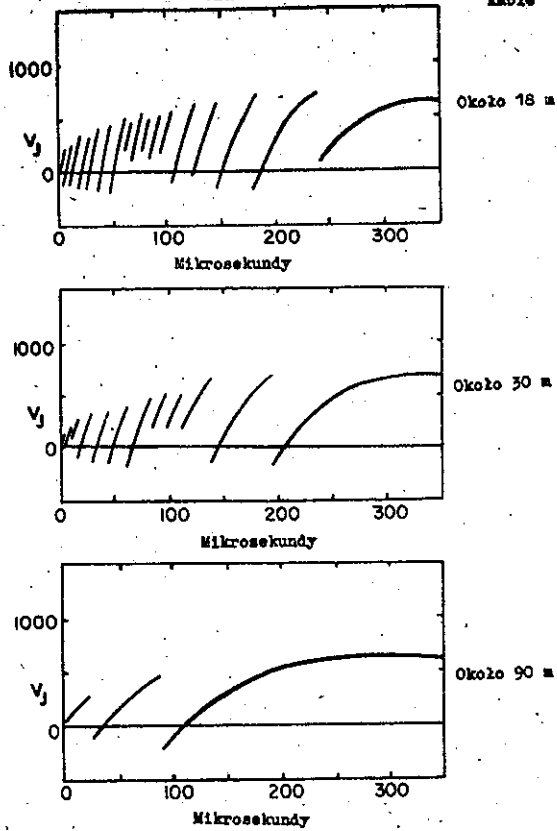


Rys. 13. Oscylogramy napięcia na otwierającym się zestyku przy różnych szybkościach otwierania zestyku



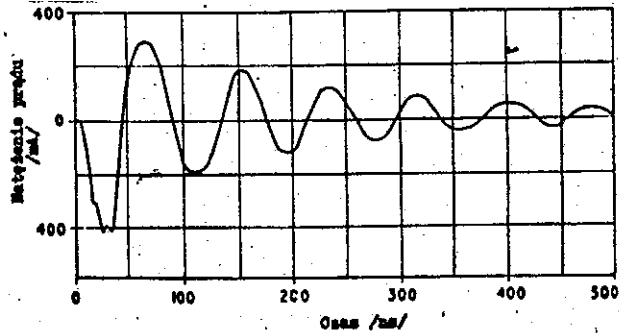
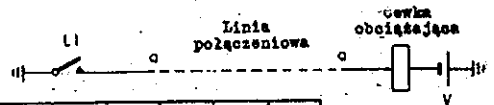
Rys. 14. Oscylogramy napięcia na otwierającym się zestyku przy różnych obciążeniach

Tabela

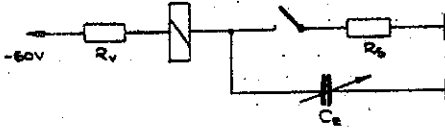


Rys. 15. Oscylogramy napięcia na otwierającym się zestyku przy różnych długościach przewodów połączeniowych

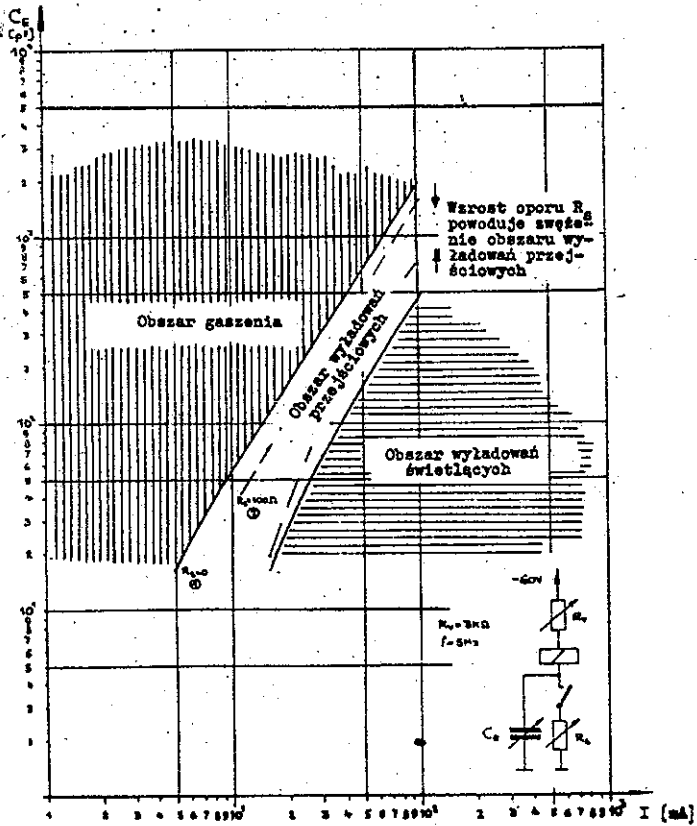
Rys. 16. Obwód obciążenia zestyku zawierający linię połączeniową



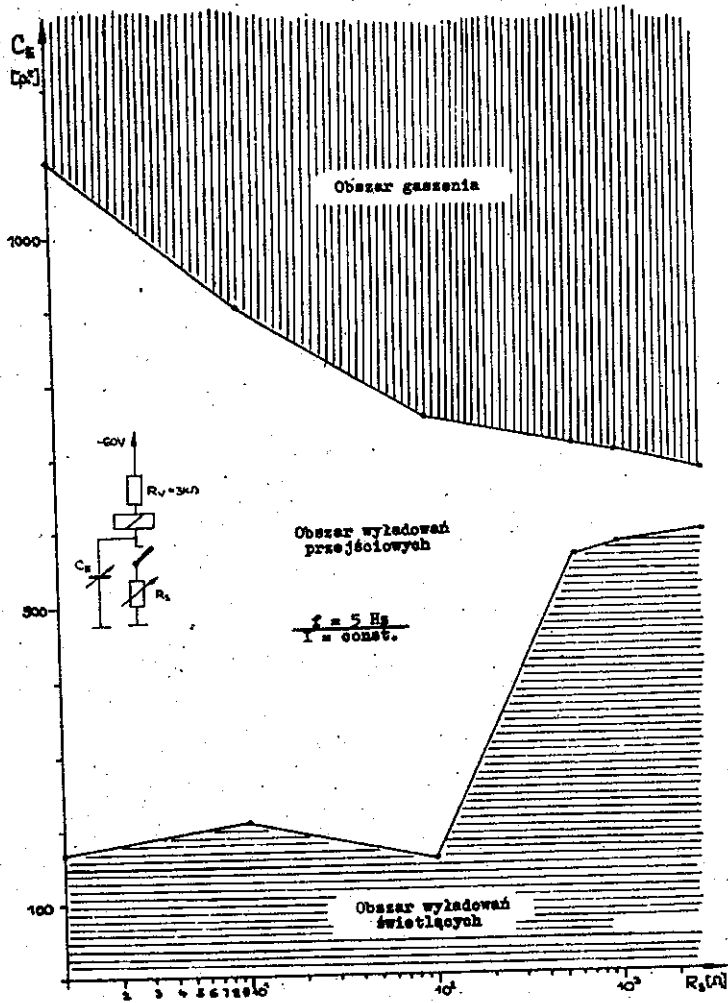
Rys. 17. Prąd rozładowania w sanykającym się zestyku



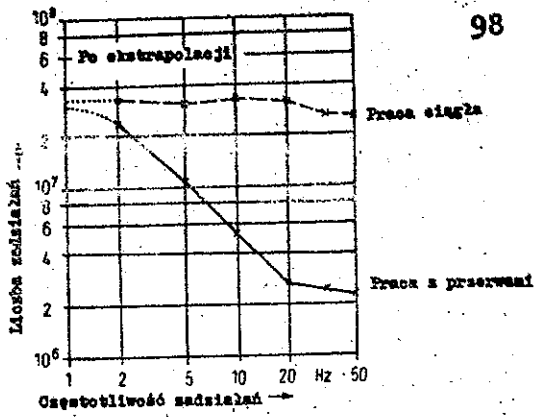
Rys. 18. Układ do badania wpływu parametrów obwodu



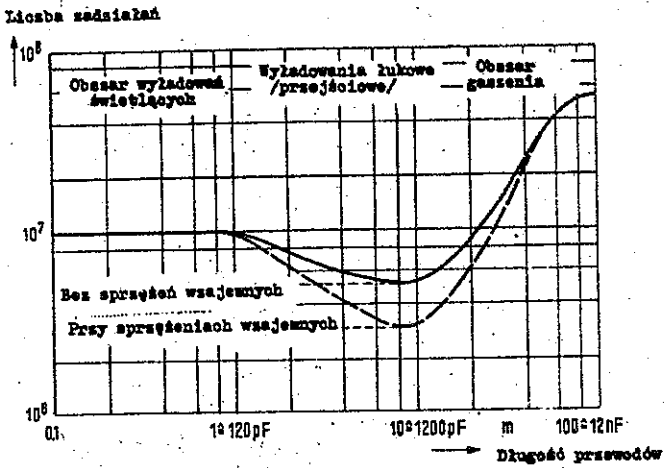
Rys. 19. Obszary wyładowań w otwierającym się zestyku w zależności od parametrów obwodu $/C_E, I/$



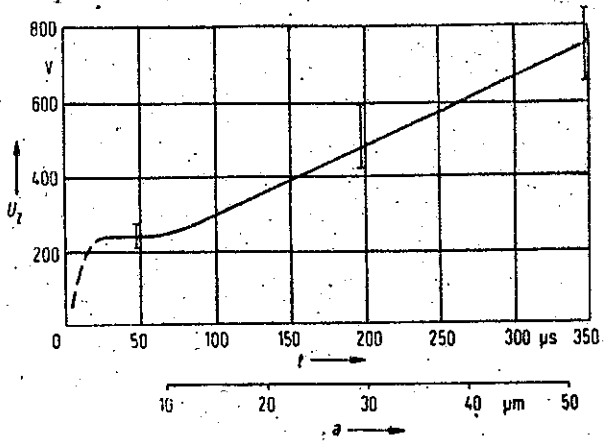
Rys. 20. Obszary wyładowań w otwierającym się zestyku w zależności od parametrów obwodu $/C_E, R_B/$



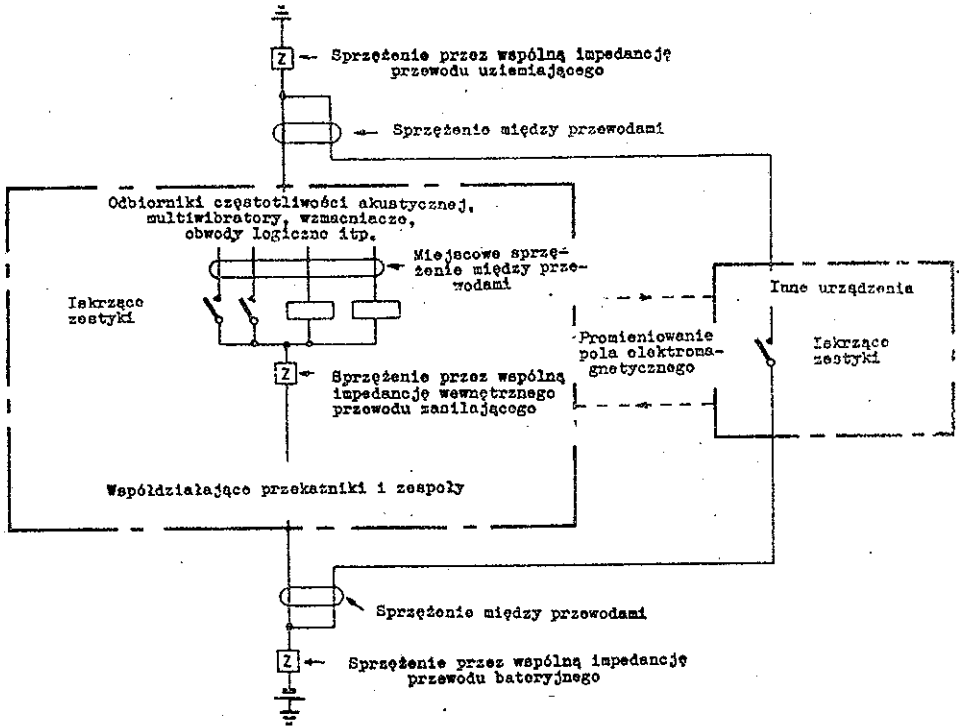
Rys. 21. Trwałość zestyku hermetycznego w zależności od częstotliwości zadziazań



Rys. 22. Trwałość zestyku hermetycznego w zależności od długości przewodów doprowadzających

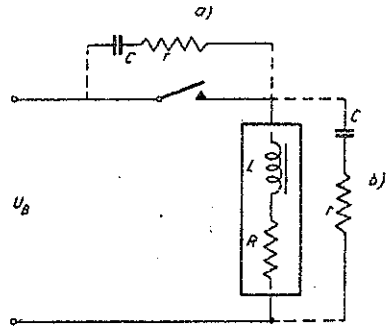


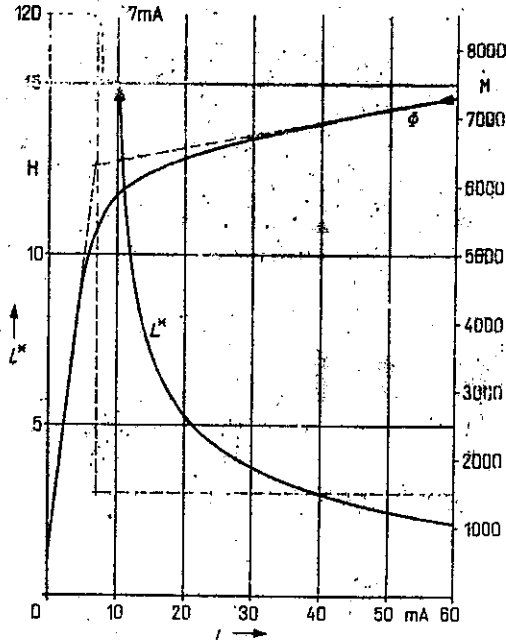
Rys. 24. Charakterystyka napięcia zapłonu U_z w zestyku otwierającym się ze stałą prędkością 15 cm/s



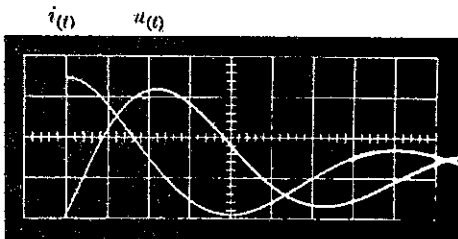
Rys. 23. Źródła i drogi rozchodzenia się zakłóceń w centrali telefonicznej

Rys. 25. Sposoby przyłączenia gaisika RC: a/ równoległe do chronionego zestyku, b/ równoległe do cewki przekaźnika

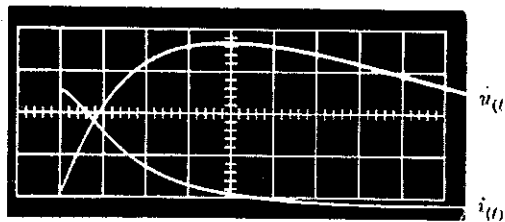




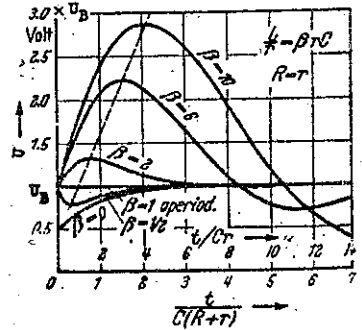
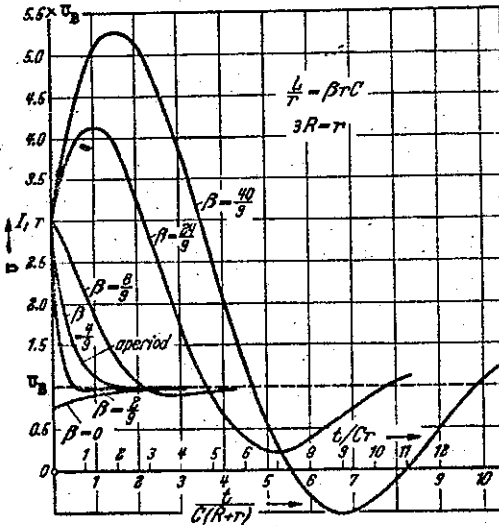
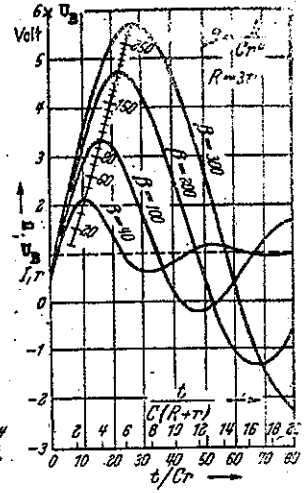
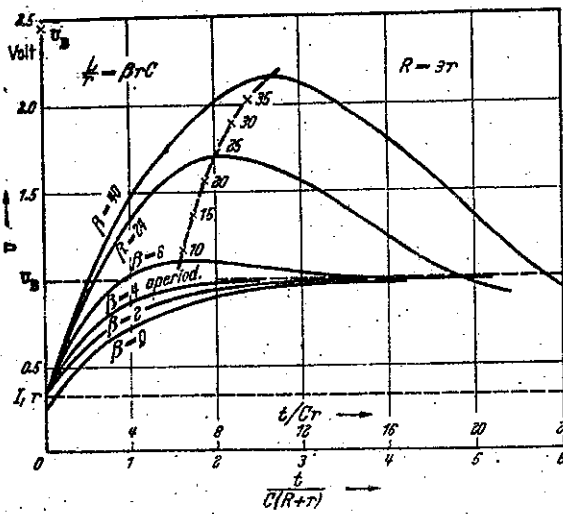
Rys. 26. Zmiany strumienia magnetycznego ϕ oraz indukcyjności L^* przekaźnika w funkcji prądu



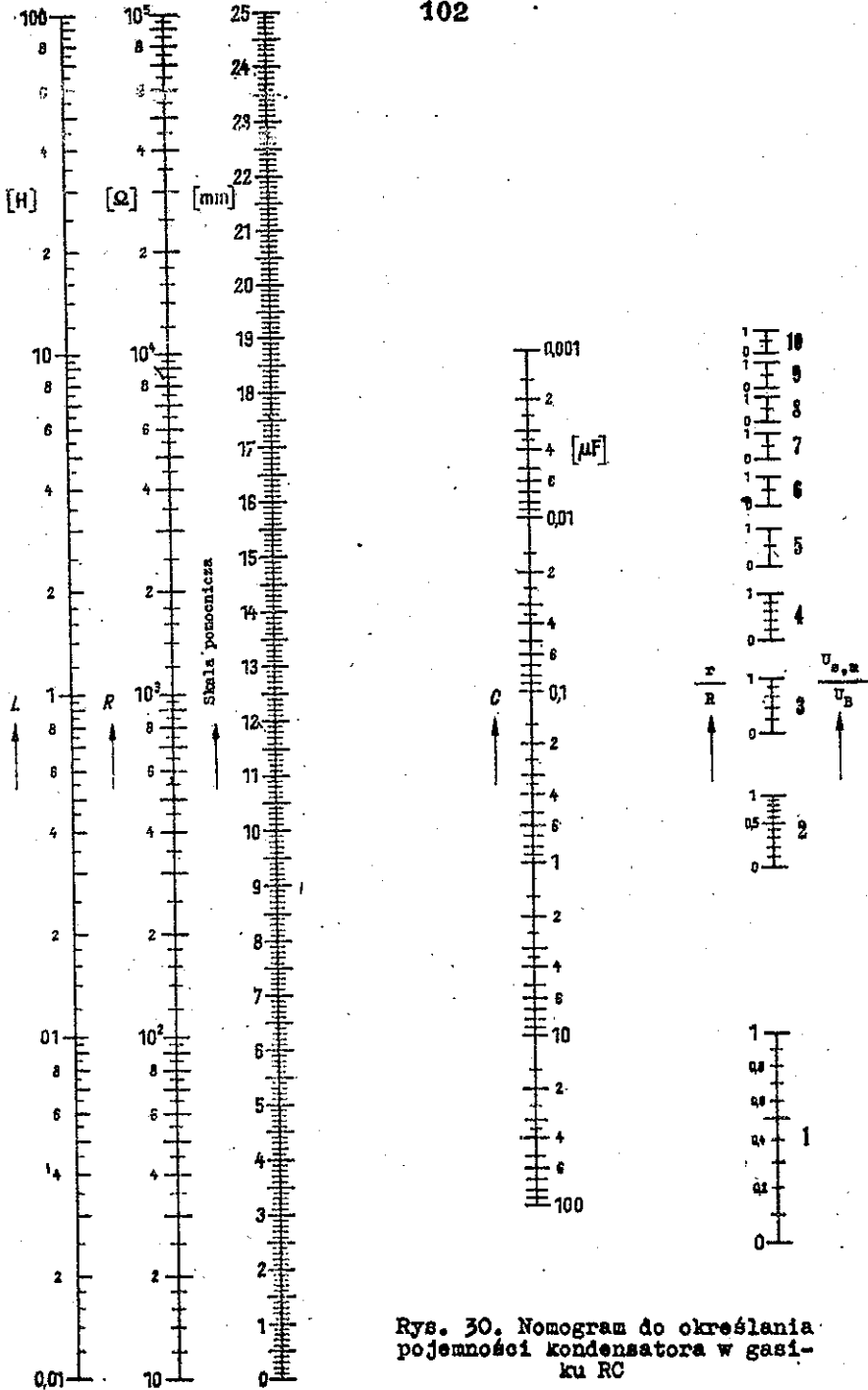
Rys. 27. Oscylogramy prądu i napięcia w otwierającym się zestyku obciążonym cewką powietrzną



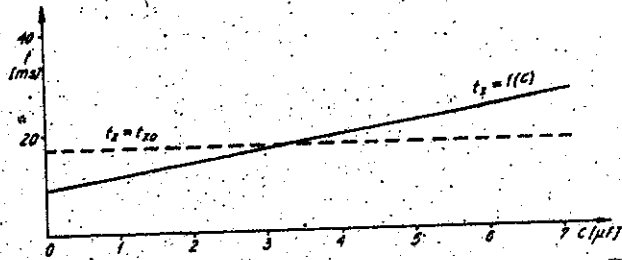
Rys. 28. Oscylogramy prądu i napięcia w otwierającym się zestyku obciążonym przekaźnikiem



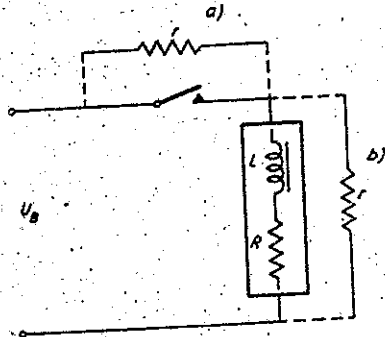
Rys. 29. Przebiegi napięcia w otwierającym się zestyku zabezpieczonym gasikiem RC przy różnych wartościach oporu gasika i różnych parametrach β .



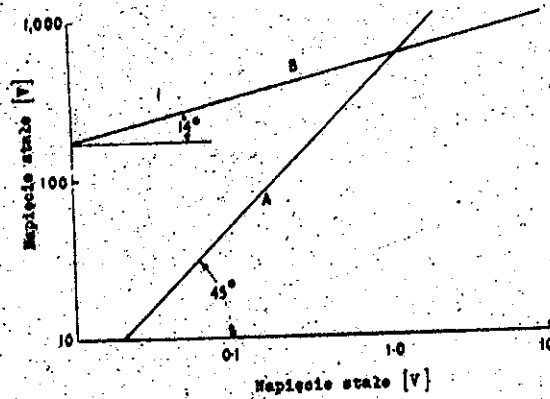
Rys. 30. Nomogram do określania pojemności kondensatora w gaśniku RC



Rys. 31. Określanie pojemności gasika metodą empiryczną

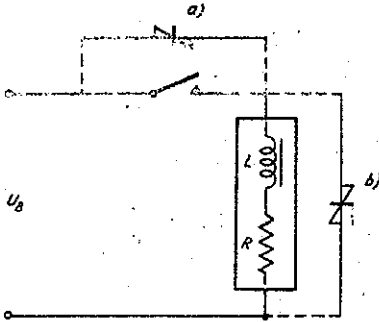


Rys. 32. Sposób przyłączenia gasika rezystorowego: a/ równoległe do zestyku, b/ równoległe do cewki przekaźnika

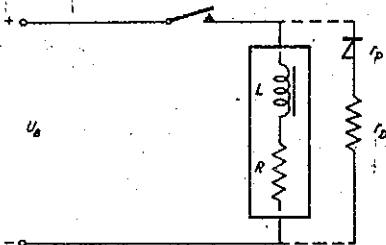


Rys. 33. Charakterystyki napięciowo-prądowe warystora i normalnego /linearnego/ opornika

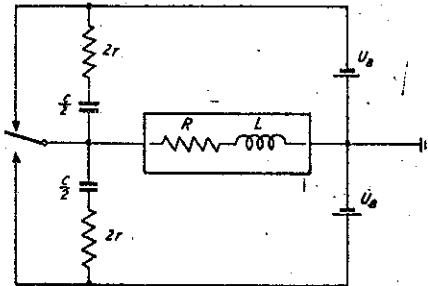
A - opornik linearny, B - warystora



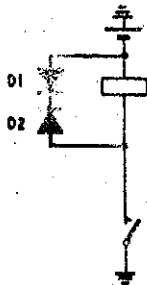
Rys. 34. Sposoby przyłączenia warystora: a/ równoległe do zestyku, b/ równoległe do cewki przekaźnika



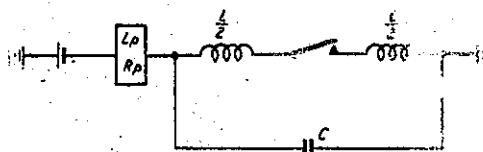
Rys. 35. Sposób przyłączenia diody lub prostownika



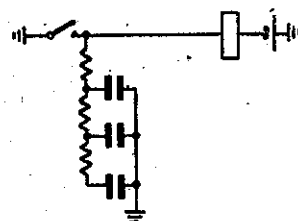
Rys. 36. Ochrona przełącznika układem gasków RC



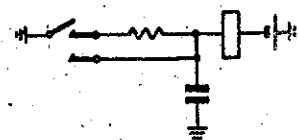
Rys. 37. Układ gaszący z dwóch diod połączonych przeciwnie



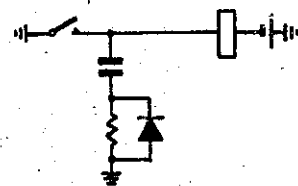
Rys. 38. Układ Larsena



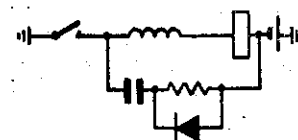
Rys. 39. Układ z rozłożoną pojemnością



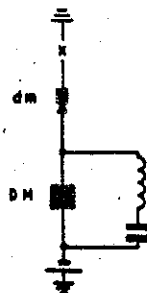
Rys. 40. Układ z pomocniczym zestykiem i dodatkowym opornikiem



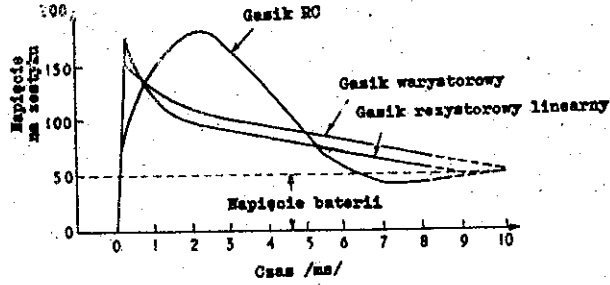
Rys. 41. Układ RC z diodą lub prostownikiem



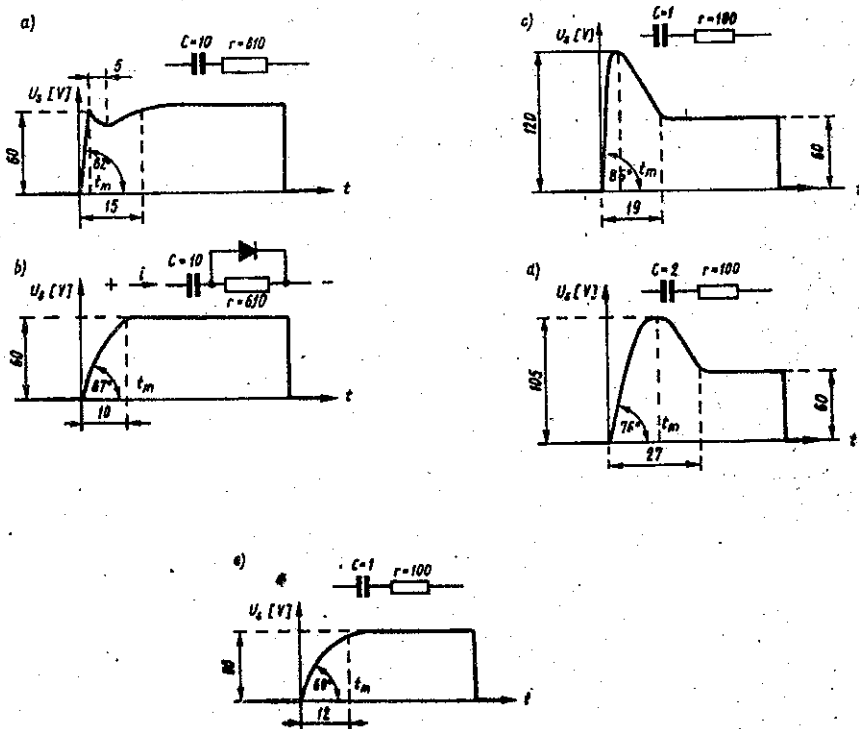
Rys. 42. Układ kombinowany RCL z diodą



Rys. 43. Układ rezonansowy LC



Rys. 44. Charakterystyki napięciowe podstawowych układów gasikowych



Rys. 45. Zmiany charakterystyk napięciowych w otwierającym się zestyku: a/, b/ - wpływ rodzaju układu gasikowego, c/, d/, e/ - wpływ parametrów elementów układu

