

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

5 (205)

1981

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

OK 21

WARSZAWA 1981

NR 5/205/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędzierski
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

doc. mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: B. Drabik

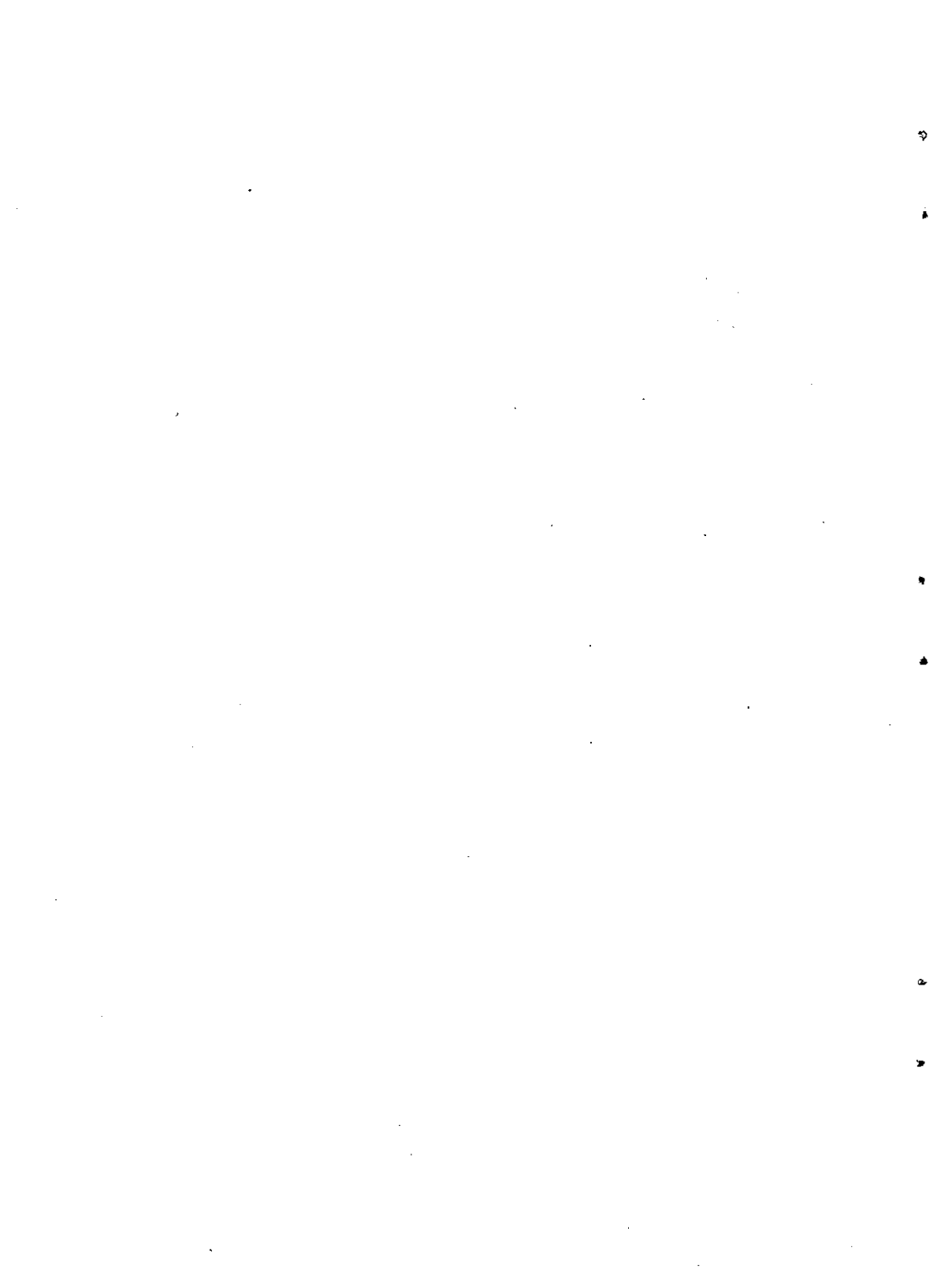
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 8.IX.1981 r.
Druk ukończono w październiku 1981 r.

Adam Moniuszko

CIŚNIENIOWA KONTROLA SZCZELNOŚCI POWŁOK KABLOWYCH
Rozważania systemowe

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	1
2. Zasadnicze definicje i prawa gazowe	2
2.1. Określenia	2
2.2. Podstawowe zależności	3
2.3. Zależność ciśnienia w funkcji długości kabla	7
2.4. Zależność ciśnienia w funkcji czasu	11
2.5. Jednostki	13
3. Możliwości realizacji kontroli ciśnieniowej	15
3.1. Warunki ogólne	15
3.2. Wymagania ciśnieniowe na fabrykacyjne odcinki kabli	19
3.3. Wymagania na zmontowane odcinki ciśnieniowe linii kablowych	23
3.3.1. Dopuszczalny ubytek gazu z nieuszkodzonego odcinka ciśnieniowego	23
3.3.2. Dopuszczalny spadek ciśnienia w nieuszkodzonym odcinku ciśnieniowym	24
3.3.3. Dopuszczalny spadek ciśnienia w uszkodzonym odcinku ciśnieniowym	28
3.4. Kontrola szczelności zmontowanych odcinków ciśnieniowych linii kablowej	31
3.5. Dotychczasowe wymagania ciśnieniowe	32
3.6. Uwagi dotyczące urządzeń kontroli ciśnieniowej	33
4. Uwagi końcowe	35
Załącznik 1. Zależności między różnymi jednostkami	37
Załącznik 2. Sprawdzenie rozwiązania równania różniczkowego	40
Wykaz literatury	42



CIŚNIENIOWA KONTROLA SZCZELNOŚCI POWŁOK KABLOWYCH

Rozważania systemowe

1. WSTĘP

Już od wielu lat stosowana jest ciśnieniowa kontrola szczelności powłok kablowych. Wiele trudności, związanych z realizacją kontroli ciśnieniowej, zdawało się powodować odstępowanie od tej metody obserwacji stanu kabli w sieciach telekomunikacyjnych, jednak niewątpliwe jej zalety i korzyści ekonomiczne spowodowały postęp w tej dziedzinie i ulepszanie systemów, co prowadzi do ciągłego wzrostu zakresu stosowania metody ciśnieniowej w eksploatacji.

Podstawową zaletą ciśnieniowej kontroli szczelności powłok kablowych jest, obok sygnalizacji powstania nieszczelności powłoki w kontrolowanym kablu, możliwość długotrwałego zabezpieczenia ośrodka kabla przed skutkami tej nieszczelności, a więc przed zawilgoceniem ośrodka, spadkiem oporności izolacji, a nawet zwarciami między żyłami, zapewniając ciągłość ruchu i pozwalając na dokonanie naprawy kabla w bardziej dogodnym czasie. Daje to oczywiście poważne korzyści ekonomiczne, wynikające przede wszystkim ze zwiększonej niezawodności kabli, zmniejszonych strat spowodowanych przerwami ruchu telekomunikacyjnego i zmniejszonych kosztów napraw.

Ciśnieniowa kontrola szczelności powłok kablowych polega na utrzymywaniu nadciśnienia suchego gazu /najczęściej powietrza lub azotu/ wewnątrz kabla i kontrolowaniu tego ciśnienia lub przepływu gazu w kablu. Stosowane są obecnie dwa systemy kontroli: system czujnikowy oraz system z automatycznym dopełnianiem gazu.

System czujnikowy kontroli ciśnieniowej polega na napełnieniu kabla sprężonym gazem do określonego, znamionowego nadciśnienia i kontrolowaniu tego ciśnienia w sposób ciągły rozmieszczonymi wewnątrz kabla /wzdłuż linii/ czujnikami ciśnieniowymi, sygnalizującymi spadek nadciśnienia poniżej ustalonej granicy w danym punkcie kabla. System ten wymaga praktycznie całkowitej szczelności kabla, choć nieco upraszcza urządzenia kontroli ciśnieniowej. Ze względu jednak na znaczne trudności w zapewnieniu

całkowitej szczelności kontrolowanej linii kablowej, zwłaszcza w przypadku kabli o powłokach nie otulanych, system ten jest stosowany coraz rzadziej.

System z automatycznym dopełnianiem gazu polega na utrzymywaniu nadciśnienia gazu w kablu w ściśle określonych granicach, kontrolowanych manometrami czujnikowymi na jednym lub obu końcach kabla i uzupełnianiu tego gazu przy każdym ubytku poniżej dopuszczalnej granicy. Uzupełnianie gazu dokonywane bywa bądź z butli ze sprężonym gazem, bądź ze sprężarki, włączanej automatycznie przez manometr czujnikowy. System ten jest znacznie dogodniejszy w eksploatacji, gdyż pozwala na wieloletnią nawet eksploatację linii, mającej drobno nieszczelności, powodujące nieznaczne ubytki gazu z kabla. Ma to duże znaczenie, ponieważ pozwala na zrezygnowanie z kłopotliwego często wielotygodniowego poszukiwania takich nieszczelności, ich lokalizowania i usuwania, co jest ponadto bardzo kosztowne i pracochłonne. W systemie tym sygnalizowany jest nadmierny przepływ gazu do uszkodzonego kabla lub spadek ciśnienia gazu w butli.

Należy ponadto wspomnieć o systemie stanowiącym połączenie obu systemów przez wprowadzenie do systemu z automatycznym dopełnianiem gazu czujników, rozmieszczonych w pewnych odstępach wzdłuż kabla w odcinku ciśnieniowym, co znacznie przyspiesza sygnalizację uszkodzenia, zwłaszcza odległego od punktu kontrolnego.

W obu rodzajach systemów kontroli ciśnieniowej istnieje szereg rozwiązań urządzeńowych, stosowane są różne metody sygnalizacji i lokalizacji uszkodzeń oparte na różnych zasadach. Sprawy te nie będą tu omawiane, gdyż konstrukcja urządzeń nie jest ostatecznie w kraju ustalona, a produkowane obecnie urządzenia wymagają modernizacji. W artykule natomiast zostaną omówione niektóre zasady kontroli ciśnieniowej, mogące mieć wpływ na projektowanie systemu, lub na rozwiązania konstrukcyjne urządzeń kontroli ciśnieniowej.

2. ZASADNICZE DEFINICJE I PRAWA GAZOWE

2.1. Określenia

Literatura techniczna w kraju na temat kontroli ciśnieniowej jest raczej skąpa, ale wiele określeń i definicji podanych jest w normie BN-76/8984-26 [1]. Niektóre jednak sformułowania wydaje się, powinny być skorygowane lub uzupełnione. Nie jest na przykład słuszne, że opór pneuma-

tyczny jednostkowy i pojemność pneumatyczna jednostkowa muszą być koniecz-
nie wyrażane w lomach i pogach. Dlatego niektóre określenia wymagają sformu-
łowania bardziej ogólnych zostaną więc tu powtórzone.

Opór pneumatyczny R_p jest to opór stawiany w stanie ustalonym ciśnie-
nia przepływności gazu przez ośrodek /np. kabla, elementu instalacji pneu-
matycznej, opornika/.

Opór pneumatyczny jednostkowy kabla jest to opór pneumatyczny odcinka
o długości 1 km.

Pojemność pneumatyczna C_p jest to stosunek masy gazu wtłoczonego do
zbiornika /np. kabla/ o określonym nadciśnieniu gazu do przyrostu nadciśnie-
nia wywołanego przez ten gaz.

Pojemność pneumatyczna jednostkowa kabla jest to pojemność pneumatyczna
odcinka kabla o długości 1 km.

Strumień przepływu gazu jest to stosunek masy gazu przepływającego w o-
środku kabla do czasu jego przepływu.

2.2. Podstawowe zależności

W kontroli ciśnieniowej kabli telekomunikacyjnych przyjmuje się na ogół
liniową zależność strumienia przepływu gazu od ciśnienia /różnicy ciśnień/.
Jest to słuszne przy małych różnicach ciśnień i dla stanów ustalonych. Ta-
kie też założenie przyjęto w rozważaniach niniejszego artykułu. Zgodnie z
określeniami, podanymi w 2.1 można napisać podstawowe wzory na poszczegól-
ne wielkości.

Strumień przepływu gazu określa wzór:

$$\phi = \frac{m_g}{t} \quad /1/$$

gdzie: m_g - masa gazu,
 t - czas przepływu gazu.

Opór przepływu gazu będzie wyrażony następująco:

$$R_p = \frac{\Delta p}{\phi} \quad /2/$$

zaś pojemność pneumatyczna:

$$C_p = \frac{m_g}{\Delta p} \quad /3/$$

lub uwzględniając wzór /1/:

$$C_p = \frac{\phi \cdot t}{\Delta p} \quad /4/$$

gdzie: Δp - różnica ciśnień gazu /przyrost ciśnienia/.

Jednostkowe parametry pneumatyczne linii kablowej będą określone jako:

$$R = \frac{R_p}{l} = \frac{\Delta p}{\phi \cdot l} \quad /5/$$

$$C = \frac{C_p}{l} = \frac{\phi \cdot t}{\Delta p \cdot l} \quad /6/$$

gdzie: l - długość kabla, w km.

Iloczyn $R_p \cdot C_p$ zwany bywa pneumatyczną stałą czasu

$$\tau = R_p C_p \quad /7/$$

Wstawiając tu zależności /2/ i /4/ otrzymamy:

$$\tau = \frac{\Delta p}{\phi} \cdot \frac{\phi \cdot t}{\Delta p} = t$$

a więc stała τ ma wymiar czasu.

Często wykorzystywanym w technice kontroli ciśnieniowej prawem gazowym jest zależność ciśnienia, objętości i temperatury gazu, słuszne dla stałej ilości gazu doskonałego:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad /8/$$

gdzie temperatura T wyrażona jest w Kelwinach $/20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}/$.

W procesie izotermicznym, to jest w stałej temperaturze $T_1 = T_2$ otrzymujemy bezpośrednio z równania /8/ stały iloczyn ciśnienia i objętości gazu:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

lub ogólnie:

$$pV = \text{const.}$$

gdzie: p - ciśnienie bezwzględne gazu, a V - objętość gazu.

Ostatnia zależność zwana jest prawem Boyle'a - Mariotte'a.

Zgodnie z tym prawem widzimy, że wtłoczenie do kabla pewnej ilości gazu o objętości ΔV w ciśnieniu p_1 powoduje wzrost ciśnienia gazu p_1 panującego w kablu o wartości Δp . Zakładając, że objętość wolnej przestrzeni wewnątrz kabla wynosi V_1 możemy napisać

$$p_1/V_1 + \Delta V = (p_1 + \Delta p)/V_1 \quad /10/$$

skąd

$$p_1 \Delta V = \Delta p \cdot V_1$$

lub

$$\Delta p = p_1 \frac{\Delta V}{V_1} \quad /11/$$

Oznaczając gęstość wtłoczonego gazu literą γ możemy napisać:

$$\Delta V = \frac{m}{\gamma}$$

skąd

$$\Delta p = p_1 \frac{m}{\gamma \cdot V_1} \quad /12/$$

Wstawiając tę zależność do wzoru /3/ otrzymamy

$$C_p = \frac{m}{\Delta p} = \frac{V_1 \cdot \gamma}{p_1} \quad /13/$$

Ponieważ objętość wolnej przestrzeni w kablu oraz gęstość gazu w stałej temperaturze są stałe, wobec tego pojemność pneumatyczna kabla jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia gazu p_1 , przy którym dokonano jej określenia. Im większe ciśnienie początkowe gazu w kablu, tym mniejsza jest, określona wzorem /3/, jego pojemność. Tłumaczy tę zależność fakt fizyczny, że ta sama ilość gazu m powoduje tym większy wzrost ciśnienia Δp , im większe było ciśnienie początkowe p_1 , co bezpośrednio wynika z zależności /11/. Należy więc pojemnością pneumatyczną kabla posługiwać się ostrożnie, pamiętając o jej właściwości. W praktyce przyjęto określać pojemność pneumatyczną kabla przy nadciśnieniu $p_0 = 0,6 \text{ kg/cm}^2$ tj. przy ciśnieniu ok. 160 kPa.

W przypadku stałej objętości, w jakiej zamknięty jest gaz, $V_1 = V_2$, na przykład w objętości odcinka kabla, zależność /8/ upraszcza się, dając możliwość określenia ciśnienia /a nie nadciśnienia/, zależnie od temperatury, otrzymując:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad /14/$$

Zależność ta wyraża znane w chemii prawo Gay-Lussaca i pozwala na określenie współczynników przez jakie należy mnożyć ciśnienie p_2 , zmierzone w temperaturze T_2 , aby odnieść je do temperatury początkowej T_1 :

$$k = \frac{T_1}{T_2} = \frac{273,15 + t_1}{273,15 + t_2} \quad /15/$$

gdzie: t_1 i t_2 temperatury wyrażane w stopniach Celsjusza.

W celu przeliczenia ciśnienia dla temperatury odniesienia $t_1 = 20^\circ\text{C}$ podano w tablicy 1 współczynniki przeliczeniowe dla temperatur $t_2 = t_1 + \Delta t$, niższych od t_1 / Δt -ujemne/ lub wyższych od t_1 / Δt -dodatnie/.

Wzór /10/ dla naciśnień Δp należałoby przekształcić wprowadzając ciśnienie atmosferyczne p_a :

$$\frac{p_a + \Delta p_1}{T_1} = \frac{p_a + \Delta p_2}{T_2}$$

skąd:

$$\frac{\Delta p_1}{T_1} = \frac{\Delta p_2}{T_2} + p_a \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

lub

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \cdot \frac{T_1}{T_2} + p_a \left(\frac{T_1}{T_2} - 1 \right) \quad /16/$$

Przy różnicy temperatur 10°C błąd określenia ciśnienia wynikający ze stosowania niewłaściwego wzoru /14/ zamiast /16/ może osiągnąć 5%.

T a b l i c a 1

Współczynniki przeliczania ciśnienia zmierzonego w temperaturze
 $t_2 = 20^\circ\text{C} + \Delta t$ dla temperatury $t_1 = 20^\circ\text{C}$

Δt $^\circ\text{C}$	k	Δt $^\circ\text{C}$	k
-20	1,0732	0	1,0000
-19	1,0693	1	0,9966
-18	1,0654	2	0,9932
-17	1,0616	3	0,9899
-16	1,0577	4	0,9865
-15	1,0539	5	0,9832
-14	1,0502	6	0,9799
-13	1,0464	7	0,9767
-12	1,0427	8	0,9734
-11	1,0390	9	0,9702
-10	1,0353	10	0,9670
-9	1,0317	11	0,9638
-8	1,0281	12	0,9607
-7	1,0245	13	0,9575
-6	1,0209	14	0,9544
-5	1,0174	15	0,9513
-4	1,0138	16	0,9482
-3	1,0103	17	0,9452
-2	1,0069	18	0,9422
-1	1,0034	19	0,9391
0	1,0000	20	0,9361

2.3. Zależność ciśnienia w funkcji długości kabla

Rozpatrując zmiany ciśnień wzdłuż kabla konieczne jest posługiwanie się prawami hydrodynamiki, słusznymi dla przepływu gazu wzdłuż przewodu rurowego o stałym przekroju. Prawa te określone są równaniami różniczkowymi cząstkowymi [2]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad /17/$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (pv)}{\partial x} = 0 \quad /18/$$

gdzie: x - współrzędna wzdłuż osi rurociągu /kabla/

y, z - współrzędne w kierunkach poprzecznych,

p - ciśnienie bezwzględne, zależne od współrzędnej x , a niezależne od współrzędnych y i z ,

v - miejscowa prędkość przepływu gazu, zależna od współrzędnych x, y, z ,

η - współczynnik lepkości płynącego gazu.

Oznaczając v_x średnią składową wzdłużną prędkości przepływu gazu, strumień przepływu gazu określony będzie wzorem:

$$\phi = v_x \cdot q \cdot \gamma^* \quad /19/$$

gdzie: q - skuteczny przekrój kabla, dostępny dla swobodnego przepływu gazu /swobodnej przestrzeni/,

γ^* - gęstość gazu.

Rozdzielając prędkość v na składową v_x oraz składową u , zależną od współrzędnych y i z otrzymamy:

$$v = v_x / x / \cdot u / y, z / \quad /20/$$

Wstawiając tę zależność do /17/ otrzymamy

$$\frac{1}{v_x} \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad /21/$$

Ponieważ lewa strona tego równania zależy tylko od x , zaś prawa tylko od y i z , oznacza to, że obie strony są stałe:

$$\frac{1}{v_x} \frac{\partial p}{\partial x} = -b \quad /22/$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{b}{\eta} \quad /23/$$

Wprowadzając w równaniu /23/ współrzędne biegunowe, zwracając uwagę, że u nie zależy od współrzędnej kątowej, lecz tylko od współrzędnej promieniowej, możemy napisać zamiast lewej strony równania /23/

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\frac{b}{\eta} \quad /24/$$

Równanie to daje całkę ogólną

$$u = -\frac{b}{4\eta} r^2 + c_1 \ln r + c_2$$

Ponieważ prędkość u znika na granicy ośrodka, to jest dla $r = a$ i ma wartość skończoną w całym przekroju ośrodka, a więc także dla $r = 0$, wynika stąd rozwiązanie szczególne, w którym $c_1 = 0$, zaś $c_2 = \frac{b}{4\eta} a^2$, skąd

$$u = \frac{b}{4\eta} /a^2 - r^2/$$

Wartość średnia tej prędkości na przekroju q jest równa jedności, co wynika z określenia /20/, to jest:

$$\frac{1}{q} \int_q u dq = 1$$

Po wykonaniu całkowania na powierzchni q , możemy dla powierzchni przekroju kołowego $q = \pi a^2$, wstawiając $dq = r dr d\varphi$ określić stałą wartość $b = \frac{8\eta}{a^2}$.

Z równania /22/ uzyskamy wtedy

$$v_x = -\frac{1}{b} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{a^2}{8\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad /25/$$

co wstawiając do wzoru /19/ daje:

$$\dot{\varphi} = -\frac{\pi a^4}{8\eta} \cdot \gamma \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad /26/$$

Wyrażając równanie /5/ w postaci różniczkowej

$$\phi = -\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial x} \quad /27/$$

I przyrównując je z zależnością /26/ widzimy, że opór pneumatyczny przewodu o regularnym przekroju kołowym jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi promienia przekroju, zaś strumień jest wprost proporcjonalny do tej wielkości.

Wykorzystując wzór /19/, równanie /18/ przyjmie postać:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{qR} \frac{\partial (p\phi)}{\partial x} = 0 \quad /28/$$

Zróżniczkowanie iloczynu $p \cdot \phi$ po wstawieniu zależności /27/ daje:

$$\frac{\partial (p\phi)}{\partial x} = -\frac{1}{R} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right] = -\frac{1}{2R} \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2}$$

co doprowadza równość /28/ do postaci:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} = 2Rq \gamma \frac{\partial p}{\partial t} \quad /29/$$

Jest to równanie słuszne dla stanu nieustalonego. W stanie ustalonym zanika zależność od czasu, co oznacza, że:

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} = 0 \quad /30/$$

Rozwiązaniem tego równania będzie:

$$p^2 = c_1 + c_2 x$$

skąd po określeniu stałych całkowania c_1 i c_2 z warunków brzegowych dla $x = 0$ oraz $x = L$ otrzymamy rozwiązanie:

$$p = \sqrt{p_1^2 - (p_1^2 - p_2^2) \frac{x}{L}} \quad /31/$$

gdzie: p_1 - bezwzględna wartość ciśnienia na początku linii / $x = 0$ /

p_2 - bezwzględna wartość ciśnienia na końcu linii $/x = L/$

L - długość linii.

Równanie /31/ uwzględnia ściśliwość gazu. Zaniedbanie tej właściwości prowadzi do przybliżonej zależności liniowej:

$$p = p_1 - /p_1 - p_2/ \frac{x}{L} \quad /32/$$

oraz do różnicowej postaci równania /27/

$$\phi = \frac{\Delta p}{R \cdot \Delta x} \quad /33/$$

zgodnego z określeniem /5/.

2.4. Zależność ciśnienia w funkcji czasu

Analizując zależność ciśnień w funkcji czasu należy postąpić się zależnością /28/. Jednak dla uproszczenia rozwiązania założymy nieściśliwość gazu, zastępując iloczyn $p\phi$ iloczynem $p_0\phi$, gdzie p_0 jest wielkością stałą. Otrzymujemy więc równanie:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p_0}{q\gamma} \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad /34/$$

a po uwzględnieniu równania /27/ uzyskamy:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{Rq\gamma}{p_0} \frac{\partial p}{\partial t} \quad /35/$$

Całką cząstkową tego równania jest tzw. całka błędu Gaussa, wyrażona funkcją:

$$G(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dz \quad /36a/$$

gdzie:

$$z = x \sqrt{\frac{Rq\gamma}{2p_0 t}} \quad /36b/$$

Chcąc uzyskać rozwiązanie, określające dla przypadku uszkodzenia kabla ciśnienie w miejscu odległym od uszkodzenia o x , w chwili t , należy przyjąć następujące warunki brzegowe:

1. Do chwili $t = 0$ /czyli przed powstaniem uszkodzenia/ ciśnienie $p(x, 0) = p_1$ niezależne od wartości x . Wynika stąd, że $z = \infty$, zaś $G/z = 1$.
2. Dla $t > 0$, ciśnienie w miejscu upływu gazu, to jest dla $x = 0$ będzie równe ciśnieniu panującemu na nieszczelności, czyli $p(0, t) = p_2$. Wynika stąd, że $z = 0$ oraz $G/z = 0$.

Otrzymujemy wtedy rozwiązanie szczególne:

$$p(x, t) = p_2 + (p_1 - p_2) \cdot G/z \quad /37/$$

Podobnie można określić warunki brzegowe dla przypadku zasilania odcinka kabla sprężonym powietrzem o ciśnieniu znamionowym p_n . Określając odległość x jako odległość punktu kabla od miejsca zasilania gazu będziemy mieli:

1. Do chwili $t = 0$ /tj. przed dołączeniem źródła sprężonego gazu/ $p(x, 0) = p_a$ niezależnie od wartości x . Wynikają stąd wartości $z = \infty$ oraz $G/z = 1$.
2. Dla $t > 0$, ciśnienie w miejscu dołączenia źródła gazu, tj. dla $x = 0$, będzie stałe, równe ciśnieniu zasilającemu $p(0, t) = p_n$. Wartości parametrów będą $z = 0$ oraz $G/z = 0$. Rozwiązanie przyjmuje więc postać /35/, jeśli zamiast p_1 wstawimy p_a , zaś zamiast p_2 wstawimy p_n , to jest:

$$p(x, t) = p_n - (p_n - p_a) \cdot G/z \quad /38/$$

Występujący w równaniu /35/ i zależności /36b/ iloczyn $Rq \gamma$ można przedstawić inaczej. Korzystając mianowicie ze wzoru /13/, w którym podstawimy

$$\gamma = q \cdot l \quad /39/$$

gdzie: l - długość kabla,
otrzymamy:

$$\gamma = p_1 C_p$$

$$q \gamma = p_1 C_p$$

$$q \gamma = p_1 \frac{C_p}{T} = p_1 C \quad /40/$$

zaś iloczyn

$$Rq \gamma = p_1 RC \quad /41/$$

Wzór /36b/ przyjmie więc postać:

$$z = x \sqrt{\frac{RC}{2t}} \quad /42/$$

2.5. Jednostki

Podstawowymi jednostkami są jednostki wyrażane w międzynarodowym układzie SI, natomiast dotychczas stosowane w kontroli ciśnieniowej są jednostki oparte na sile wyrażonej w kG i ciśnieniu w kG/cm² lub w G/cm². Jak wiadomo, w układzie SI ustalono jako podstawową jednostkę siły 1N, zaś ciśnienie 1Pa. Wynikają stąd odpowiednie jednostki oporu przepływu gazu i pojemności gazowej, zgodnie z określeniami podanymi w 2.1 i wzorami w 2.2.

Jednostki będą więc następujące.

Jednostki strumienia przepływu gazu $\beta = \frac{m}{t}$

- w układzie SI $1 \frac{kg}{s}$

- dotychczas stosowana $1 \frac{g}{h}$

Jednostkami oporu przepływu gazu $R_p = \frac{p}{\beta}$ będą:

- w układzie SI $1 Pa : 1 \frac{kg}{s} = 1 \frac{Pa \cdot s}{kg}$

- dotychczas stosowaną jednostką był 1 lom:

$$1 Lo = 1 \frac{G}{cm^2} : 1 \frac{g}{h} = 1 \frac{G \cdot h}{cm^2 \cdot g}$$

Dla wygody proponuję oznaczyć jednostkę oporności w układzie SI literą φ , tak więc jednostka oporności będzie wyrażona jako

$$1 \frac{Pa \cdot s}{kg} = 1 \varphi$$

Wzajemną zależność tych jednostek można wyrazić, dokonując prostych przekształceń i przyjmując przyspieszenie ziemskie $g = 9,80665 \frac{m}{s^2}$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ Lo} &= 1 \frac{Gh}{cm^2 g} = \frac{10^{-3} \text{ kG} \cdot 3600s}{10^{-4} m^2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = \frac{9,80665 \cdot 3600 \text{ kg m s}}{10^{-4} \text{ kg m}^2 s^2} = \\
 &= 3,530394 \cdot 10^8 \frac{Ns}{m^2 kg} = 0,3530394 \cdot 10^9 \frac{Pa \cdot s}{kg} = \\
 &= 0,3530394 \cdot 10^9 \varphi = 0,3530394 \text{ G}\varphi
 \end{aligned}$$

lub odwrotnie:

$$1 \varphi = 2,832545 \cdot 10^{-9} \text{ Lo}$$

Pojemność gazowa $C_p = \frac{m}{p}$ będzie wyrażona w jednostkach:

- w układzie SI $1 \frac{kg}{Pa}$

- dotychczas stosowaną jednostką był 1 pog

$$1 \text{ Po} = 1 \text{ g} : 1 \frac{G}{cm^2} = 1 \frac{g \cdot cm^2}{G}$$

Wzajemną zależność tych jednostek określają odpowiednio współczynniki:

$$1 \frac{kg}{Pa} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Po}$$

$$1 \text{ Po} = 10,1972 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{Pa}$$

Pneumatyczną stałą czasu określa iloczyn

$$\mathcal{T} = R_p C_p$$

stąd też jednostkę określa się jako iloczyn jednostek oporu pneumatycznego i pojemności pneumatycznej, a więc:

- w układzie SI: $1 \varphi \cdot 1 \frac{kg}{Pa} = 1 \frac{Pa \cdot s}{kg} \cdot 1 \frac{kg}{Pa} = 1s$

- w dotychczas stosowanych jednostkach:

$$1 \text{ Lo} \cdot 1 \text{ Po} = 1 \frac{\text{Gh}}{\text{cm}^2 \text{g}} \cdot 1 \frac{\text{gcm}^2}{\text{G}} = 1 \text{ h}$$

Masę gazu wyraża się w g lub kg, względnie mg. Jak wiadomo, 1 m³ suchego powietrza w normalnych warunkach /tzn. w temperaturze +20°C i przy ciśnieniu 1 kg/cm² = 98,1 kPa/ ma masę ok. 1,205 kg. Stąd 1 dm³ powietrza ma masę 1,205 g. Natomiast 1 m³ azotu ma masę 1,165 kg, zaś 1 dm³ - 1,165 g.

Wzajemne zależności między różnymi jednostkami podane są w załączniku 1. W celu określenia współczynników dla jednostek strumienia przepływu gazu przyjęto gęstość powietrza równą 1,293 g/dm³, zaś azotu 1,2506 g/dm³, w temperaturze 0°C i przy ciśnieniu 760 mm Hg /normalnym ciśnieniu atmosferycznym/.

Do praktycznych obliczeń wystarczy zaokrąglenie współczynników podanych w tablicach do 2-3 miejsc po przecinku.

Dla informacji warto jeszcze podać, że w literaturze angielskiej stosowana bywa jednostka ciśnienia 1 psi, która wyraża ciśnienie wywierane przez 1 funt ang. siły na cal kwadratowy. Ponieważ 1 funt siły jest to 1 funt masy pomnożonej przez przyspieszenie ziemskie g, stąd wynika zależność

$$1 \text{ psi} = 1 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{in}^2} = 9,80665 \frac{\text{lb} \cdot \text{m}}{\text{in}^2 \cdot \text{s}^2} = 6,89476 \text{ kPa} = 7,0307 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

3. MOŻLIWOŚCI REALIZACJI KONTROLI CIŚNIENIOWEJ

3.1. Warunki ogólne

Sposób projektowania systemu ciśnieniowej kontroli szczelności powłok kablowych zależy od typu chronionego kabla i jego parametrów pneumatycznych. Wykonane dotychczas w kraju pomiary i zrealizowane systemy kontroli pozwalają na stwierdzenie, że właściwie wszystkie typy kabli mogą być poddane ciśnieniowej kontroli szczelności. Większe trudności w realizacji kontroli przedstawiają kable o większym oporze pneumatycznym, a więc ogólnie - kable o małej średnicy wewnętrznej przekroju kabla pod powłoką. Duże opory pneumatyczne mają kable współosiowe małowymiarowe, zwłaszcza o powłoce alu-

miniowej gładkiej, bez specjalnego wypełniania niektórych przestrzeni między wiązkami lub parami, na przykład rurką, zwiększającą swobodny przepływ gazu. Duże opory pneumatyczne zdarzają się również wśród kabli miejscowych o małej liczbie, ściśle "upakowanych" wiązek. Parametry pneumatyczne niektórych typów kabli produkcji krajowej, pomierzone przez CLTM - GUTH^{x/}, podane są przykładowo w tabelicy 2.

Badania wykonane zarówno przez Instytut Łączności jak i przez CLTM - GUTH, potwierdziły możliwość stosowania kontroli ciśnieniowej na kablach o powłokach metalowych /ołowianych, aluminiowych lub stalowych/, a także na kablach o powłokach polietylenowych. Należy jednak stwierdzić, że kable o izolacji z tworzyw sztucznych stwarzają większe trudności montażowe, polegające przede wszystkim na niepewności wykonania całkowicie gazoszczelnych przegród na ośrodku kabla. Montaż szczelnych złączy na kablach o powłokach aluminiowych i polietylenowych jest również trudniejszy niż na kablach ołowianych, zwłaszcza wobec braku odpowiedniej jakości osprzętu liniowego do montażu kabli.

Trudności technologiczne w produkcji całkowicie gazoszczelnych aluminiowych powłok kabli dalekosiężnych stwarzają nowe problemy związane z systemami kontroli szczelności zmontowanych linii. Jest to tym bardziej kłopotliwe, że nieszczelności powstałe w procesie produkcji powłok kablowych, to jest przy ich spawaniu, zostają częściowo lub chwilowo zaklejone lepiszczem bitumicznym i wytłaczaną osłoną ochronną polietylenową. Uszczelnienie to jest jednak niepewne, budząc obawy, że ujawnić się może później, w trakcie montażu linii, a nawet w czasie eksploatacji gotowej linii. Nieszczelności tego rodzaju są zwykle bardzo małe, a więc bardzo trudne do zlokalizowania metodami pneumatycznymi lub nawet za pomocą radioaktywnych gazów, gdyż częstowpływ gazu z kabla na zewnątrz na skutek istnienia w kablu szczelnej osłony i lepiszczu, następuje w zupełnie innym miejscu niż miejsce, w którym powłoka jest nieszczelna. Prace te są żmudne, czasochłonne, a więc i kosztowne.

Wprowadzenie systemów kontroli ciśnieniowej kabli z automatycznym dopętnianiem gazu dało przestanki do złączenia wymagań absolutnej szczelności powłok zmontowanych kabli wobec możliwości uzupełniania niewielkich ubytków gazu z kabla dzięki sprężarkom lub zbiornikom ze sprężonym gazem,

^{x/} Pomiarzy wykonał I. Zalewski.

Parametry pneumatyczne kabli

Lp.	Typ i rodzaj kabla	Opór jednostkowy pn.		Pojemność jedn. pn.	
		$\frac{GPa \cdot s}{kg \cdot km} = \frac{GQ}{km}$	Lo/km	$\frac{kg}{Pa \cdot km} \cdot 10^{-6}$	Po/km
1	2	3	4	5	6
	Kable dalekosiężne o powłoce otowianej				
1	TKD 114x2 /20x2x1,3e+ +5x2x1,3+89x2x0,9/	od 2,12 do 2,37	od 6,0 do 6,7		
2	TKD 112ax2 /4x2x1,4e+18x4x1,4+ +38x4x0,9/	0,62	1,75		
3	TKD 15ax2 /7x4x1,2+1x2x0,8/	2,86	8,1		
	Kable dalekosiężne o powłoce Al				
4	Al TKDXpx 48x4x0,9	0,95	2,7		
5	" 91x4x0,9	0,55	1,56	8,3	0,815
6	" 7x4x1,2	1,57	4,45		
7	" 19x4x1,2	0,92	2,6	3,8	0,373
8	" 28x4x1,2	0,49	1,4		
9	" 37x4x1,2	0,23	0,65		
10	" 61x4x1,2	0,18	0,52		
11	ALTKDNXpx 84x2x0,8	0,21	0,6		
	Kable współosiowe małowymiarowe				
12	TKDW 4x1,2/4,4 prod. franc.	6,35	18,0	2,14	0,21
13	AITKDW 4x1,2/3,4 powł. gładka	7,48	21,2		
14	AITKDW 4x1,2/3,4 powł. falowana	0,25	0,7		
15	AITKDW 4x1,2/4,4+ +14x4x0,9	3,10	8,78		
16	AITKDW 6x1,2/4,4 wypetn. rurką	0,40	1,14	2,86	0,28

1	2	3	4	5	6
17	AITKDW 6x1,2/4,4 wypełn. sznurkiem	0,575	1,63		
18	AITKDW 6x1,2/4,4+ +17x4x0,9	0,49	1,4	2,55	0,25
19	Kable współosiowe normalnowymiarowe TKDW 4x2,6/9,5	1,20	3,4	3,26	0,32
20	Kable miejscowe o powłoce polietyl. XTKMX 56x4x0,6	12,92	36,6		
21	" 100x4x0,6	1,02	2,9	4,33	0,425
22	" 200x4x0,6	1,48	4,2	3,16	0,31
23	" 250x4x0,6	2,51	7,1	3,76	0,369

stałe zasilałym nadzorowany kabeł. Koszt takiego uzupełniania ubytku gazu jest niewielki, przy czym system ten daje inne, znaczne korzyści polegające na możliwości dalszej ochrony kabła, nawet uszkodzonego. W niektórych więc krajach dopuszcza się ubytki gazu w nowo zmontowanych liniach kablowych. We Francji na przykład opracowano system [3] pozwalający na ubytek gazu $5 \text{ dm}^3/\text{h}$, pod warunkiem, że nie nastąpi wtedy na kablu spadek ciśnienia większy niż 5 mbar/km tj. $0,5 \text{ kPa/km}$. Jest to możliwe, gdy opór pneumatyczny kabła nie przekracza ok. $0,3 \text{ Gg/km}$ lub ok. $0,85 \text{ Lo/km}$, który to warunek spełniają tylko niektóre kable. W systemie tym przyjęto wartość znamionową ciśnienia, wynoszącą 500 mbar , czyli 50 kPa .

W przypadku starych linii kablowych, gdy usuwanie wszystkich szczelności byłoby nie tylko bardzo trudne i kosztowne, lecz często wręcz niemożliwe na kablach będących w eksploatacji, dopuszcza się większe ubytki gazu, dochodzące do $20 \text{ dm}^3/\text{h}$, przy czym w żadnym miejscu nie powinno wystąpić niższe nadciśnienie niż 350 mbar , to jest 35 kPa .

Wydaje się, że są to wielkości przyjęte dość rozsądnie, biorąc pod uwagę fakt, że sprężarki stosowane w systemach kontroli ciśnieniowej stanowią źródło o wydajności $2...5 \text{ m}^3/\text{h}$, uzupełnianie więc gazu na te drobne nieszczelności stanowi tylko $0,1\%$ lub co najwyżej 1% . Butla ze sprężonym powietrzem o masie gazu 3 kg wystarczyłaby na ponad 20 dob , a w najgorszym razie, na istniejących liniach przy ubytkach $20 \text{ dm}^3/\text{h}$ czas ten skróciłby się

do ponad 5 dób. Jest to tym bardziej uzasadnione, że tak zwaną absolutną szczelność trudno jest sprawdzić wobec ograniczonej dokładności pomiaru ciśnienia i temperatury kabla, mającej znaczący wpływ na wartość nadciśnienia panującego w kablu, gdyż zmiana wartości wynosi tu ok. 0,3%/°C.

W tej sytuacji należałoby rozważyć, jakim wymaganiom pneumatycznym powinny odpowiadać odcinki fabrykacyjne kabli i zmontowane odcinki ciśnieniowe, aby skuteczność ochrony kabli była wystarczająca, a montaż kabli nie był niepotrzebnie zbyt utrudniony.

Przyjmując na przykład dla nowo budowanych linii dopuszczalny ubytek powietrza, wynoszący $5 \text{ dm}^3/\text{h}$ co odpowiada $1,67 \text{ mg/s}$, należy strumień ten rozdzielić na ubytki gazu poprzez nieszczelności odcinków fabrykacyjnych kabla oraz ubytki poprzez nieszczelności spowodowane niedokładnościami montażu /w złączach i przegrodach gazoszczelnych/. Biorąc pod uwagę duże trudności w utrzymaniu w terenie właściwej technologii montażu oraz brak najodpowiedniejszego osprzętu do montażu, należałoby przeznaczyć na ubytki gazu z tego powodu nieco większe ilości strumienia niż ubytki w odcinkach fabrykacyjnych. Z tego powodu do dalszych rozważań przyjęto, że ubytki powietrza spowodowane niedokładnościami montażu nie powinny przekraczać $3 \text{ dm}^3/\text{h}$, tj. 1 mg/s , zaś ubytki spowodowane nieszczelnościami powłoki w odcinkach fabrykacyjnych kabli zainstalowanych w jednym odcinku ciśnieniowym nie będą mogły przekroczyć $2 \text{ dm}^3/\text{h}$, tj. $0,67 \text{ mg/s}$.

Spełnienie tych wymagań powinno być zagwarantowane na każdym odcinku ciśnieniowym linii zasilanym jednostronnie. Zasilanie dwustronne nie powinno łagodzić wymagań na odcinki fabrykacyjne kabli, gdyż system ten, aby był ekonomiczny, musi umożliwiać dwukrotne wydłużenie odcinka ciśnieniowego. Można natomiast zgodzić się z dwukrotnym zwiększeniem ubytku gazu na takim odcinku, tj. do wartości $10 \text{ dm}^3/\text{h}$, czyli $3,33 \text{ mg/s}$.

3.2. Wymagania ciśnieniowe na fabrykacyjne odcinki kabli

Zgodnie z przyjętym w 3.1 założeniem ubytek gazu $2 \text{ dm}^3/\text{h}$, to jest $0,67 \text{ mg/s}$, dopuszczalny w odcinkach fabrykacyjnych składających się na odcinek ciśnieniowy, pozwala na określenie wymagań dotyczących szczelności odcinków fabrykacyjnych kabli. Wydaje się, że tylko część produkowanych odcinków fabrykacyjnych jest nieszczelna i można na przykład przyjęć, że co najwyżej 20% odcinków fabrykacyjnych kabli przypadających na odcinek ciśnieniowy może być nieszczelnych. Zakładając długość odcinka ciśnienio-

wego $L = 6$ km oraz długość odcinka fabrykacyjnego $l = 0,4$ km otrzymamy, że średnio może być nieszczelnych n odcinków:

$$n = \frac{L}{l} \cdot 20\% \quad /43/$$

Dla przyjętych tu długości $n = 3$, stąd dopuszczalny ubytek gazu w każdym odcinku fabrykacyjnym wyniesie po $2/3$ dm³/h lub po 0,222 mg/s.

Korzystając ze wzoru /11/ mamy:

$$\Delta p = p_1 \frac{\Delta v}{v_1}$$

dzieląc równanie przez czas oraz oznaczywszy strumień ubytku gazu $\vartheta_u = \frac{\Delta v}{t}$ otrzymamy:

$$\frac{\Delta p}{t} = \frac{p_1}{v_1} \frac{\Delta v}{t} = \frac{p_1}{v_1} \vartheta_u \quad /44/$$

gdzie ϑ_u - strumień w dm³/h, t - czas w godzinach.

Określona wzorem /13/ pojemność C_p słuszna jest dla ciśnienia $p_o = 1,6$ kg/cm² ≈ 160 kPa, a stąd objętość przestrzeni wolnej w kablu będzie określona jako:

$$v_1 = \frac{C_o p_o}{\gamma} \quad /45/$$

Wstawiając tę wielkość do wzoru /44/ otrzymamy:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_1 \gamma}{p_o C_p} \cdot \vartheta_u$$

lub

$$\Delta p = \frac{p_1 \gamma}{p_o C_p} \cdot \vartheta_u \cdot \Delta t \quad /46/$$

gdzie $\vartheta_u \cdot \gamma$ - strumień w kg/s; Δt - czas, w s.

Jest to dopuszczalny spadek ciśnienia Δp w stosunku do ciśnienia początkowego p_1 w czasie Δt przy założonym dopuszczalnym ubytku gazu ϑ_u .

Dla przykładu obliczmy spadek ciśnienia powietrza Δp przyjmując następujące dane:

$p_o = 160$ kPa, $p_1 = 300$ kPa /ok. 2 kg/cm² nadciśnienia/

$$\gamma = 1,205 \text{ kg/m}^3, \quad C_p = C \cdot l = 8,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 = 3,32 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{Pa}}$$

$$\rho_u \cdot \dot{V} = 0,222 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}, \quad \Delta t = 7200 \text{ s.}$$

Po dokonaniu obliczeń otrzymamy $\Delta p = 0,9 \text{ kPa} = 0,0092 \text{ kg/cm}^2$, a więc taki spadek ciśnienia nastąpi w ciągu 2 godzin w odcinku fabrykacyjnym o długości 0,4 km.

Ogólnym warunkiem na dopuszczalny spadek ciśnienia w każdym z 20% nieszczelnych odcinków fabrykacyjnych kabli, będzie wzór wynikający ze wzoru /44/.

$$\Delta p = \frac{2}{3} \frac{p_1}{V_1} t \quad [\text{kPa}] \quad /47a/$$

lub ze wzoru /46/:

$$\Delta p = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p_1}{C \cdot l} t \quad [\text{kPa}] \quad /47b/$$

gdzie: p_1 - wartość bezwzględna ciśnienia /suma ciśnienia zewnętrznego i nadciśnienia panującego w kablu/, w kPa

V_1 - objętość wolnej przestrzeni w odcinku fabrykacyjnym kabla, w dm^3

C - pneumatyczna pojemność jednostkowa kabla, w $\text{kg/Pa} \cdot \text{km}$

l - długość odcinka fabrykacyjnego kabla, w m

t - czas sprawdzania, w h.

Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że odcinki fabrykacyjne kabli, uznane za całkowicie szczelne, mogłyby być sprawdzane na przykład przy nadciśnieniu 200 kPa w ciągu 6 godzin jedynie z dokładnością 0,1 kPa. Oznacza to, że we wszystkich tych odcinkach trzeba się liczyć z ubytkiem gazu, który nie zostanie wykryty, a którego strumień można określić, wykorzystując wzór /44/:

$$\phi_n = \frac{V_1 \cdot \Delta p}{p_1 \cdot t} \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{h}} \right] \quad /48a/$$

lub korzystając ze wzoru /46/:

$$\phi_u = 44,4 \cdot 10^3 \frac{C \cdot l}{p_1 \cdot t} \cdot \Delta p \quad [\text{mg/s}] \quad /48b/$$

gdzie oznaczenia wielkości i ich jednostki przyjęto jak we wzorach /47/.

Postępując się tymi wzorami można byłoby obliczyć łączny ubytek gazu /strumień/ wypływający ze wszystkich odcinków fabrykacyjnych kabli, składających się na odcinek ciśnieniowy. Oznaczając strumień ubytku gazu ϑ'_u z odcinków uznanych za szczelne oraz dopuszczalny strumień ϑ''_u z odcinków nieszczelnych otrzymamy łączny strumień ubytku gazu:

$$\vartheta_u = \vartheta'_u + \vartheta''_u = \frac{v_1}{p_1} \left(\frac{n' \Delta p'}{t'} + \frac{n'' \Delta p''}{t''} \right) \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{h}} \right] \quad /49a/$$

lub

$$\vartheta_u = \vartheta'_u + \vartheta''_u = 44,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Cl}}{p_1} \left(\frac{n' \cdot \Delta p'}{t'} + \frac{n'' \cdot \Delta p''}{t''} \right) \left[\frac{\text{mg}}{\text{s}} \right] \quad /49b/$$

gdzie: n' , n'' - liczby odcinków fabrykacyjnych uznanych odpowiednio za szczelne lub nieszczelne, określone wzorem /43/

$\Delta p'$ - dokładność odczytu ciśnienia, w kPa

$\Delta p''$ - dopuszczalny spadek ciśnienia w odcinku nieszczelnym, w kPa

t' , t'' - czasy sprawdzania odcinków, w h.

Pozostałe wielkości i ich jednostki są zgodne z przyjętymi we wzorach /47/.

Postępując się wzorem /49b/ i przyjmując wartości jak w poprzednim przykładzie, a mianowicie:

$$C = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/Pa} \cdot \text{km}, \quad l = 400 \text{ m}, \quad p_1 = 300 \text{ kPa},$$

$$n' = 80\% \cdot \frac{6 \text{ km}}{0,4 \text{ km}} = 12$$

$$n'' = 20\% \cdot \frac{6 \text{ km}}{0,4 \text{ km}} = 3$$

$$\Delta p' = 0,1 \text{ kPa}, \quad \Delta p'' = 1 \text{ kPa}$$

$$t' = 6 \text{ h}, \quad t'' = 2 \text{ h}$$

otrzymamy

$$\vartheta = 44,4 \cdot 10^3 \cdot \frac{8,3 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{300} \left(\frac{12 \cdot 0,1}{6} + \frac{3 \cdot 1}{2} \right) = 0,835 \text{ mg/s}$$

a więc łączny strumień ubytku gazu przekroczył dopuszczalną wartość

0,67 mg/s, gdyż wzięto za duży spadek ciśnienia $\Delta p'' = 1$ kPa.

Powyższy przykład został obliczony dla kabla o stosunkowo dużej pneumatycznej pojemności jednostkowej, dlatego dopuszczalny spadek ciśnienia w odcinku fabrykacyjnym nieszczelnym jest mały i wynosi 0,9 kPa przy próbie nadciśnienia 200 kPa w ciągu 2 h lub np. 2,7 kPa w ciągu 6 h. W przypadku sprawdzania nieszczelności kabli o mniejszych pojemnościach uzyskuje się większe spadki ciśnień. Na przykład dla kabla, którego $C = 3,16$ kg/Pa·km dopuszczalny spadek ciśnienia wyniesie ok. 2,4 kPa w ciągu 2 h. Ważne jest jednak założenie, aby łączny strumień ubytku gazu określony wzorami /49/ nie przekroczył wartości dopuszczalnej 0,67 mg/s.

Należy tu zaznaczyć, że w wielu przypadkach krótki czas sprawdzania szczelności kabli nie jest miarodajny, zwłaszcza na kablach wyposażonych w osłony, pod którymi jest lepiszczce, gdyż na takich kablach czas "ujawniania" się nieszczelności może być znaczny. Dlatego oprócz kontroli gotowych kabli powinny być sprawdzane w procesie produkcji kable, których powłoki nie zostały jeszcze pokryte lepiszczem i osłonami ochronnymi.

3.3. Wymagania na zmontowane odcinki ciśnieniowe linii kablowych

3.3.1. Dopuszczalny ubytek gazu z nieuszkodzonego odcinka ciśnieniowego

Jak wspomiano w 3.1, oprócz ubytków gazu w samych kablach na zmontowanych odcinkach ciśnieniowych występują ubytki gazu wynikające z niedokładności wykonania złączy, przegród gazoszczelnych a także na skutek nieszczelności w samych kablach, które jednak ujawniły się dopiero po ułożeniu kabli i ich zmontowaniu. Mogą ponadto wystąpić dodatkowe ubytki gazu na skutek nieszczelności zasobników wszelkich urządzeń liniowych włączonych w kabel, jeśli zasobniki te są również kontrolowane tym samym ciśnieniem gazu, we wspólnym systemie kontroli ciśnieniowej.

Trudno jest podzielić jaką część dopuszczalnego ubytku gazu należy przeznaczyć na ubytki w złączach i przegrodach gazoszczelnych, jaką część na nowo powstałe w samych kablach nieszczelności, czy też na nieszczelności w zasobnikach wzmacniaków, regeneratorów nicobstugiowanych lub skrzyń pupinizacyjnych. Dlatego należy przyjąć za nadrzędny warunek, aby łączny ubytek gazu w zmontowanej linii nie przekroczył $5 \text{ dm}^3/\text{h}$ lub $1,67 \text{ mg/s}$.

Oczywiście wykonawca montażu może i powinien zadbać o to, aby wszelkie nieszczelności powstające w trakcie budowy linii, w każdym jej etapie, by-

ty wykrywane niemal natychmiast, w chwili ich powstawania, tym niemniej jest to bardzo żmudne i nie zawsze dające pełny sukces. Dlatego też dokonuje się sprawdzenia szczelności odcinków fabrykacyjnych zaraz po transporcie i bezpośrednio przed wzięciem ich do układania. Bardzo ułatwia tu kontrolę podanie przez producenta dokładnej wartości nadciśnienia powietrza w kablu i temperatury kabla, przy której to ciśnienie zmierzono, zakładając, że wartości te są podawane rzetelnie, a manometry są dokładne. Mimo to mogą być pewne nieścisłości ze względu na fakt, że pomiary nadciśnienia przed transportem i po transporcie wykonywane są różnymi manometrami, błędy więc bezwzględne tych pomiarów mogą być większe, jednak możliwe jest wykrycie ewentualnych poważniejszych nieszczelności. Układane kable powinny być napełnione sprężonym gazem, którego nadciśnienie powinno być sprawdzone i porównane z nadciśnieniem przed układaniem, co z kolei pozwala na eliminowanie nieszczelności powstałych w trakcie układania kabla. Wskazane jest także sprawdzanie szczelności części zmontowanych odcinków linii, np. po połączeniu 4 odcinków fabrykacyjnych kabli. Czynności te są wprawdzie pracochłonne, jednak jest to i tak znacznie szybsze niż lokalizowanie i usuwanie nieszczelności wykrytych dopiero po zmontowaniu całego odcinka ciśnieniowego.

3.3.2. Dopuszczalny spadek ciśnienia w nieuszkodzonym odcinku ciśnieniowym

Drugim wymaganiem stawianym odcinkom ciśnieniowym jest podany w 3.1 warunek nie przekroczenia spadku ciśnienia na jednym km nieuszkodzonej linii o wartości 0,5 kPa/km. Wymaganie to wydaje się być bardzo ostre i chyba nie w każdym punkcie linii może być spełnione. Postępując się wzorem różnicowym /33/, z którego określimy jednostkowy opór pneumatyczny kabla:

$$R = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad /50/$$

oraz przyjmując warunek

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} \leq 0,5 \text{ kPa/km} = 500 \text{ Pa/km}$$

otrzymamy:

$$R \leq \frac{0,5}{\theta_U} \left[\frac{\text{G}\varphi}{\text{km}} \right] \quad /51/$$

gdzie: θ_U - łączny strumień ubytku gazu w odcinku ciśnieniowym, w mg/s, określony na przykład wg /49b/.

Przyjmując łączny strumień ubytku gazu w odcinku ciśnieniowym $\theta_U = 1,67$ mg/s otrzymamy:

$$R \leq \frac{0,5}{1,67} = 0,3 \text{ G}\varphi/\text{km}$$

co odpowiada wartości 0,85 Lo/km. Tylko niektóre kable mają pneumatyczny opór jednostkowy mniejszy od tej wartości.

Sytuację jednak poprawia fakt, że dopuszczalny strumień 1,67 mg/s nie płynie wzdłuż całego odcinka ciśnieniowego, gdyż miejsca ubytków gazu rozmieszczone są wzdłuż całego kabla i spadek ciśnienia na kablu maleje w funkcji wzrostu odległości od źródła zasilania. Zakładając równomierne rozmieszczenie wzdłuż kabla ubytków gazu, wprowadzamy pojęcie jednostkowego strumienia ubytku gazu, oznaczając go φ . Jednostkowy strumień φ jest wówczas stały, niezależny od odległości x od źródła zasilania. Przyrost strumienia ubytku gazu w funkcji odległości x będzie więc ujemny, co można zapisać

$$\frac{d\theta}{dx} = -\varphi \quad /52/$$

Wykorzystując zależność /27/ i różniczkując ją otrzymamy

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{R} \frac{d^2 p}{dx^2} \quad /53/$$

Przyrównując do siebie /52/ i /53/ otrzymamy:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \varphi R$$

skąd po scałkowaniu otrzymujemy:

$$p/x/ = \frac{1}{2} \varphi R x^2 + C_1 x + C_2$$

Jednym z warunków brzegowych jest warunek, że $p(0) = p_1$; skąd $C_2 = p_1$.
Strumień ubytku gazu określony jest zależnością /27/:

$$q(x) = -\frac{1}{R} \frac{dp}{dx} = -\varphi x - \frac{C_1}{R} \quad /54/$$

W przypadku jednostronnego zasilania, na końcu odcinka zasileniowego strumień ubytku będzie równy zeru, to jest:

$$q(L) = -\varphi L - \frac{C_1}{R} = 0$$

skąd

$$C_1 = -\varphi RL$$

Otrzymamy więc przy jednostronnym zasilaniu gazem

$$p(x) = \frac{1}{2} \varphi R x^2 - \varphi R L x + p_1 \quad /55a/$$

Przy dwustronnym zasilaniu gazem strumień ubytku gazu będzie zerowy w środku odcinka, tj. dla $x = \frac{L}{2}$

skąd

$$C_1 = -\frac{1}{2} \varphi RL$$

Ciśnienie więc przy dwustronnym zasilaniu będzie

$$p(x) = \frac{1}{2} \varphi R x^2 - \frac{1}{2} \varphi R L x + p_1 \quad /55b/$$

Największy spadek ciśnienia nastąpi więc przy jednostronnym zasilaniu gazem, na końcu odcinka ciśnieniowego, tj. wg /55a/:

$$p(L) = p_1 - \frac{1}{2} \varphi R L^2 \quad /56a/$$

zaś przy dwustronnym zasilaniu gazem, w połowie odcinka ciśnieniowego; tj. wg /55b/:

$$p\left(\frac{L}{2}\right) = p_1 - \frac{1}{8} \varphi R L^2 \quad /56b/$$

Średni spadek ciśnienia w odniesieniu do jednostki długości określony będzie:

- przy jednostronnym zasilaniu gazem

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1}{2} \varphi R L \quad /57a/$$

- przy dwustronnym zasilaniu gazem

$$\frac{\Delta p}{L/2} = \frac{1}{4} \varphi R L \quad /57b/$$

Jest oczywiste, że całkowity strumień będzie przy jednostronnym zasilaniu określony jako:

$$\varnothing_u = \varphi L \quad /58a/$$

Przy dwustronnym zasilaniu można dopuścić większy strumień, to jest:

$$\varnothing_u = \varphi \cdot \frac{L}{2} \quad /58b/$$

co uwzględnwszy w równaniach /57/ daje jednostkowy spadek ciśnienia /na 1 km linii/ w obu przypadkach jednakowy, wynoszący:

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{2} \varnothing_u R \quad /59/$$

skąd:

$$R \leq \frac{2}{\varnothing_u} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad /60/$$

W porównaniu ze wzorem /50/ daje to dwukrotnie większą wartość wynoszącą $R = 0,6 \text{ G /km} = 1,7 \text{ Lo/km}$, co jest wartością znacznie większą, jednak i tę wartość niektóre kable przekraczają. W rzeczywistości spadki ciśnienia będą przyjmowały wartości pośrednie między tymi przypadkami, stąd dopuszczalne opory pneumatyczne będą zawarte między 0,3 a 0,6 G /km.

Rozważania te wskazują, że możliwe byłoby przyjęcie większego dopuszczalnego spadku ciśnienia na kablu do wartości 1 kPa/km, co pozwoli na bardziej ekonomiczne projektowanie systemu kontroli ciśnieniowej dla większości kabli, których pneumatyczny opór jednostkowy nie przekracza 1 G/km, tj. ok. 2,8 Lo/km. System z dwustronnym zasilaniem gazu pozwala na zastosowanie 4-krotnie dłuższych odcinków ciśnieniowych. W przypadku jednak dużych jednostkowych oporów pneumatycznych kabli konieczne jest

skracanie odcinków ciśnieniowych odwrotnie proporcjonalnie do oporów pneumatycznych kabli.

Wartością graniczną, której nie należy przekraczać jest wartość spadku ciśnienia $\Delta p = 5 \text{ kPa}$. Długość tę określi wzór wynikający ze wzorów /57/

- dla jednostronnego zasilania gazem:

$$L < \frac{2\Delta p}{\beta_U \cdot R} = \frac{6}{R} \quad [\text{km}] \quad /61a/$$

- dla dwustronnego zasilania

$$L < \frac{8\Delta p}{\beta_U \cdot R} = \frac{24}{R} \quad [\text{km}] \quad /61b/$$

gdzie: $p = 5 \text{ kPa}$, $\beta_U = 1,67 \text{ mg/s}$

R - pneumatyczny opór jednostkowy, w $\text{G}\phi/\text{km}$.

3.3.3. Dopuszczalny spadek ciśnienia w uszkodzonym odcinku ciśnieniowym

W przypadku uszkodzenia kabla w odcinku ciśnieniowym powstała nieszczelność powoduje nagły wzrost strumienia gazu wypływającego z kabla, a tym samym i strumienia gazu wpływającego do kabla ze źródła zasilania. Strumień dopuszczalnego ubytku gazu β_U wzrasta o strumień, którego wartość zależy od oporu nieszczelności oraz od różnicy ciśnień, powodującej przepływ gazu. Pomijając krótki stosunkowo czas stanu nieustalonego, gdy początkowo duży strumień zmaleje do wartości ustalonej, można posłużyć się przybliżoną zależnością różnicową /33/. Różnicę ciśnień określimy jako:

$$\Delta p = p_1 - p_a$$

gdzie: p_1 - ciśnienie panujące na początku odcinka, w miejscu zasilania,
 p_a - ciśnienie panujące na zewnątrz kabla w miejscu uszkodzenia.

Natomiast opór pneumatyczny odcinka kabla o długości x należy powiększyć o wartość oporu nieszczelności $R_s^{x/}$ oraz oporu opornika pneumatycznego W ewentualnie włączonego na początku odcinka ciśnieniowego. Stąd strumień upływu na skutek powstałej nieszczelności będzie:

$$\beta_s = \frac{p_1 - p_a}{R\Delta x + R_s + W} \quad /62/$$

^{x/} Zwykle opór nieszczelności ma wartość bardzo małą.

Najmniejszy strumień wystąpi przy uszkodzeniu w punkcie najbardziej oddalonym od źródeł zasilania, a więc:

- w przypadku jednostronnego zasilania, gdy $\Delta x = L$

$$\theta_s = \frac{p_1 - p_a}{RL + R_s + W} \quad /63a/$$

- zaś w przypadku dwustronnego zasilania, gdy $\Delta x = \frac{L}{2}$; wtedy z każdej strony odcinka popłynę strumień:

$$\theta_s = \frac{p_1 - p_a}{R \frac{L}{2} + R_s + W_1} \quad /63b/$$

Określony tu strumień gazu wyphywającego przez uszkodzenie powiększa strumień ubytku gazu, wyphywający przez nieszczelności nieuszkodzonej linii, łączny więc strumień przepływający przez kabel będzie:

$$\theta = \theta_u + \theta_s \quad /64/$$

Z punktu widzenia ochrony ośrodka kabla przed zawilgoceniem w przypadku uszkodzenia jego powłoki jest pożądane, aby wyphywający z kabla strumień był jak największy. Oznaczając najmniejszą żadaną wartość strumienia zabezpieczającego kabel przez θ_z należy stwierdzić, że:

- w przypadku jednostronnego zasilania powinien być spełniony warunek

$$\theta_s \geq \theta_z$$

- w przypadku dwustronnego zasilania $\theta_s \geq \theta_z/2$.

Największy spadek ciśnienia wyznaczony równaniami /56/ będzie powiększony o spadek ciśnienia spowodowany przepływem strumienia θ_s przez ośrodek kabla oraz łącznego strumienia gazu przez opornik pneumatyczny W , włączony na początku kabla. Oznaczwszy ciśnienie gazu w miejscu uszkodzenia powłoki jako p_z , po uwzględnieniu zależności /58/ otrzymamy:

- w przypadku jednostronnego zasilania:

$$p_1 - p_z = \frac{1}{2} \theta_u RL + \theta_z RL + \theta_u + \theta_z / W$$

skąd

$$L_{\max} = \frac{p_1 - p_z - \theta_u + \theta_z / W}{R \left(\frac{1}{2} \theta_u + \theta_z \right)} \quad /65a/$$

- przy dwustronnym zasilaniu:

$$p_1 - p_z = \frac{1}{4} \vartheta_u RL + \frac{1}{4} \vartheta_z RL + \vartheta_u + \frac{1}{2} \vartheta_z / W_1$$

skąd

$$L_{\max} = \frac{2 [2(p_1 - p_z) - \vartheta_u - \vartheta_z / W_1]}{R / \vartheta_u + \vartheta_z} \quad /65b/$$

Należy tu zauważyć, że w celu uzyskania lepszych parametrów kontroli ciśnieniowej pożądane jest stosowanie możliwie wysokich ciśnień, co z kolei ograniczone jest wytrzymałością powłoki kabli, ich złączy i urządzeń włączanych do kabla, na długotrwałe działania nadciśnienia. Aby jednak na różnych liniach, mających różne nieszczelności, różne ubytki gazu ϑ_u , kontrola ciśnieniowa w tym samym stopniu chroniła linię przed wtargnięciem do niej wilgoci, jest celowe takie ustalenie ciśnienia p_n na wejściu urządzeń liniowych, a więc przed opornikiem W , żeby na wejściu linii, za opornikiem W , panowało ustalone, znamionowe ciśnienie p_1 . W takim przypadku wzory /65/ będą słuszne, po podstawieniu w tych wzorach wartości $W = 0$ lub $W_1 = 0$.

Łatwo zauważyć, że gdyby wszystkie odcinki fabrykacyjne kabli były całkowicie szczelne ($\vartheta_u = 0$), wtedy przy dwustronnym zasilaniu kabla sprężonym gazem można by zastosować odcinek ciśnieniowy prawie 4-krotnie dłuższy niż przy zasilaniu jednostronnym. Dla przykładu obliczmy dopuszczalną długość odcinka ciśnieniowego przy następujących założeniach:

$$\vartheta_z = \vartheta_u = 1,67 \text{ mg/s} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$$

$$p_1 = 150 \text{ kPa}, \quad p_z = 110 \text{ kPa}$$

$$R = 1 \text{ Gg/km}, \quad W = W_1 = 2,12 \text{ Gg}$$

Długość odcinka ciśnieniowego przy jednostronnym zasilaniu wyniesie:

$$L'_{\max} = \frac{150 - 110 \cdot 10^3 - 1,67 + 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot 2,12 \cdot 10^9}{1 \cdot 10^9 / \frac{1}{2} \cdot 1,67 + 1,67 \cdot 10^{-6}} = 13,14 \text{ km}$$

zaś przy dwustronnym zasilaniu:

$$L''_{\max} = \frac{2 [2(150 - 110 \cdot 10^3) - 2 \cdot 1,67 + 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot 2,12 \cdot 10^9]}{1 \cdot 10^9 / 1,67 + 1,67 \cdot 10^{-6}} = 41,54 \text{ km}$$

a więc przy dwustronnym zasilaniu uzyskuje się ponad 3 razy dłuższy odcinek niż przy zasilaniu jednostronnym. Zmniejszenie tego stosunku /z czterech/ nastąpiło na skutek dopuszczenia dwukrotnie większego ubytku gazu przy dwustronnym zasilaniu, gdyż zgodnie z /58b/ założono ten sam strumień \varnothing_u na połowie długości odcinka ciśnieniowego. Zwiększenie oporu pneumatycznego R oczywiście wymaga zmniejszenia długości L /odwrotnie proporcjonalnie/ dla zapewnienia wielkości strumienia zabezpieczającego \varnothing_z .

Postępując się wzorami /65/ należy również sprawdzić czy założone parametry systemu kontroli ciśnieniowej pozwalają na uzyskanie wymaganego strumienia zabezpieczającego gazu \varnothing_z , obliczając go zgodnie ze wzorami /58/ i /63/.

3.4. Kontrola szczelności zmontowanych odcinków ciśnieniowych linii kablowej

Każdy zmontowany odcinek ciśnieniowy linii kablowej powinien być poddany kontroli, w celu stwierdzenia szczelności montażu. Dopuszczalnym jednak stały ubytek gazu w odcinku ciśnieniowym nie można wymagać całkowitej szczelności i trzeba się liczyć ze spadkiem ciśnienia, spowodowanym dopuszczalnym ubytkiem gazu $\varnothing_u = 5 \text{ dm}^3/\text{h} = 1,67 \text{ mg/s}$.

Przy założeniu równomiernego podziału strumienia \varnothing_u wzdłuż kabla, równania /55/ i /58/ określają ciśnienie panujące w punkcie x linii, gdy na jej początku panuje stałe ciśnienie gazu p_1 .

W celu dokonania kontroli szczelności zmontowanej linii, po napełnieniu odcinka ciśnieniowego gazem o ciśnieniu p_1 , odłącza się źródło gazu od kabla, zamykając go szczelnie i sprawdza się spadek ciśnienia po upływie określonego czasu. Zakładając tu liniową zależność można wykorzystać wzory /44/ lub /46/. Dla ułatwienia postępowania się nimi wprowadzimy przyjęte z założenia dane liczbowe, oraz oznaczenia odnoszące się do całego odcinka ciśnieniowego, a mianowicie:

- objętość wolnej przestrzeni w odcinku ciśnieniowym kabla V_k
- pneumatyczna pojemność odcinka ciśnieniowego kabla $C_p = CL$,

ponadto:

$$\varnothing_u = 1,67 \text{ mg/s} = 5 \text{ dm}^3/\text{h}$$

$\Delta t = 3600 t [s]$, gdzie t - czas, w h

$$\gamma = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

$$p_1 = p_0 = 160 \text{ kPa}$$

Otrzymamy stąd na podstawie wzoru /44/:

$$\Delta p = 800 \frac{t}{v_k} [\text{kPa}] \quad /66/$$

zaś na podstawie wzoru /46/:

$$\Delta p = 6 \cdot 10^{-6} \frac{t}{CL} [\text{kPa}] \quad /67/$$

gdzie: t - czas próby, w h,

v_k - objętość wolnej przestrzeni w ośrodku odcinka ciśnieniowego kabla, w dm^3 ,

C - pneumatyczna pojemność jednostkowa kabla, w $\text{kg/Pa} \cdot \text{km}$

L - długość odcinka ciśnieniowego, w km.

Wzory /66/ i /67/ określają dopuszczalny spadek ciśnienia w zmontowanym odcinku ciśnieniowym linii kablowej, przy założeniu dopuszczalnego ubytku gazu $5 \text{ dm}^3/\text{h}$ lub $1,67 \text{ mg/s}$.

Dla przykładu dopuszczalny spadek ciśnienia w odcinku ciśnieniowym o długości $L = 6 \text{ km}$ w ciągu 6 dób na linii, w której kabłe mają jednostkową pojemność pneumatyczną $C = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/Pa} \cdot \text{km}$ wyniesie:

$$\Delta p = 6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{6 \cdot 24}{8,3 \cdot 10^{-6} \cdot 6} = 17,3 \text{ kPa} = 0,177 \text{ kg/cm}^2$$

3.5. Dotychczasowe wymagania ciśnieniowe

Dotychczas stawiane były w Polsce wymagania szczelności kabli o powłokach metalowych, natomiast nie uzgodniono wymagań na szczelność kabli o powłokach z tworzyw termoplastycznych. Wyjątek stanowią tu wymagania Kryteriów Jakościowych Grupowych ustalone przez Biuro Badawcze ds. Jakości SEP na kabłe miejscowe typu XTKMX oznaczone znakiem jakości "1".

Zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm telekomunikacyjne kabłe dalekosiężne oraz kabłe miejscowe o powłokach otowlanych powinny być szczelne

l nie wykazywać żadnego spadku ciśnienia przy próbie nadciśnieniem $2,5 \text{ kg/cm}^2$ /245 kPa/ w ciągu 16 h, przy dokładności odczytu $0,01 \text{ kg/cm}^2$ /0,98 kPa/.

W stosunku do nowo produkowanych typów kabli o powłokach aluminiowych wymagania obowiązujących Warunków Technicznych, a także Kryteriów Jakościowych Grupowych, nie dopuszczają spadku ciśnienia przy badaniu w ciągu 12 h ciśnieniem $0,8$ do $1,2 \text{ kg/cm}^2$ /78,5 do 117,7 kPa/ przy dokładności odczytu $0,05 \text{ kg/cm}^2$ /4,9 kPa/.

Wspomniane wyżej Kryteria Jakościowe Grupowe na kable miejscowe o izolacji i powłoce polietylenowej typu XTKMX wymagają całkowitej szczelności powłok kablowych przy badaniu ciśnieniem 150 kPa w ciągu 2 h, przy dokładności odczytu 5 kPa.

Z zestawienia tego widać niejednorodność wymagań, wynikającą głównie stąd, iż postanowienia poszczególnych dokumentów podejmowane były w różnym, często bardzo od siebie odległym czasie, jednocześnie przy stałej tendencji, zwłaszcza producentów, do skrócenia czasu próby ciśnieniowej.

W zmontowanych liniach dalekosiężnych przyjęto znamionowe nadciśnienie wynoszące $0,6 \text{ kg/cm}^2$ /58,8 kPa/, wymagając szczelności, zapewniającej, że spadek nadciśnienia w ciągu 9 dni nie będzie większy niż $0,03 \text{ kg/cm}^2$ /1,96 kPa/.

W liniach sieci miejscowych lub wewnątrzstrefowych przyjęto znamionowe nadciśnienie 60 kPa i wymaganie szczelności, zapewniającej, że spadek nadciśnienia nie może przekroczyć 2 kPa w ciągu 6 dób w liniach o długości do 4 km lub 3 kPa w ciągu 12 dób w liniach o większej długości.

3.6. Uwagi dotyczące urządzeń kontroli ciśnieniowej

Urządzenia kontroli ciśnieniowej z automatycznym dopełnianiem gazu powinny być projektowane oszczędnie, to znaczy tak aby nie były zbyt duże, aby były dostatecznie wydajne, ale nie pochłaniały zbyt wiele energii elektrycznej do zasilania.

Wydaje się, że rozsądne wartości ciśnienia byłyby następujące:

- nadciśnienie maksymalne 500 kPa
- nadciśnienie minimalne, przy którym następuje włączenie sprężarki 200 kPa
- objętość zbiornika sprężonego gazu 50 dm^3 .

Korzystając z prawa Boyle'a - Mariotte'a /9/ możemy napisać równania dla skrajnych stanów ciśnienia w zbiorniku sprężarki w porównaniu z ciśnieniem panującym w kablu, otrzymamy:

$$p_1 V = p_k V_{k1}$$

$$p_2 V = p_k V_{k2}$$

gdzie: p_1, p_2 - ciśnienie panujące w zbiorniku sprężarki, maksymalne i minimalne

V - objętość zbiornika sprężonego gazu

p_k - ciśnienie panujące w kablu

V_k - objętość gazu przy ciśnieniu p_k , odpowiadająca zawartości zbiornika.

Odejmując równania stronami otrzymamy:

$$(p_1 - p_2) V = p_k (V_{k1} - V_{k2})$$

Stąd:

$$V_k = V_{k1} - V_{k2} = \frac{p_1 - p_2}{p_k} \cdot V \quad /68/$$

Różnica $V_{k1} - V_{k2}$ określa objętość gazu wtłoczonego w kabel pod ciśnieniem p_k . W zaokrągleniu można przyjąć $p_k = 150$ kPa, natomiast pozostałe wartości będą: $p_1 = 600$ kPa, $p_2 = 300$ kPa, $V = 50$ dm³,

stąd

$$V_{k1} - V_{k2} = \frac{p_1 - p_2}{p_k} \cdot V = \frac{600 - 300}{150} \cdot 50 = 100 \text{ dm}^3$$

Znając ubytki gazu z kabla w różnych warunkach można obliczyć czas, na jaki wystarczy zasób gazu ze zbiornika lub z butli sprężonego gazu:

$$t = \frac{\Delta V_k}{\beta} \quad /69/$$

W przypadku szczelnego kabla, przy dopuszczalnym ubytku gazu:

$$t_1 = \frac{\Delta V_k}{\beta_u} = \frac{100 \text{ cm}^3}{5 \text{ dm}^3/\text{h}} = 20 \text{ h}$$

W przypadku uszkodzenia kabla przy nieszczelności powodującej przepływ strumienia gazu $\dot{V}_z = 1,67 \text{ mg/s} = 5 \text{ dm}^3/\text{h}$

$$t_2 = \frac{\Delta V_k}{\dot{V}_u + \dot{V}_z} = \frac{100}{5+5} = 10 \text{ h}$$

Przy zastosowaniu natomiast butli o pojemności $V = 27 \text{ dm}^3$ przy nadciśnieniu $p = 15 \text{ MPa}$ uzyskuje się z jednej, stosunkowo małej, butli ilość powietrza

$$V_k = \frac{p}{p_k} V = \frac{15 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^3} \cdot 27 \text{ dm}^3 = 2700 \text{ dm}^3$$

Odpowiednie czasy, na jakie wystarczy jedna butla, będą:

$$t_1 = 540 \text{ h} = 22 \frac{1}{2} \text{ doby}$$

$$t_2 = 270 \text{ h} = 11 \frac{1}{4} \text{ doby}$$

Butle o pojemności 40 dm^3 wystarczą odpowiednio na $33 \frac{1}{3}$ doby lub $16 \frac{2}{3}$ doby.

4. UWAGI KOŃCOWE

Poruszone tu zagadnienia nie wyczerpują oczywiście wszystkich spraw związanych z kontrolą ciśnieniową szczelności powłok kablowych. Wiele jeszcze problemów wymagać będzie studiów i pomiarów parametrów pneumatycznych, rozważań nad racjonalnym ustaleniem wymagań, a zwłaszcza prac konstrukcyjnych i wykonawczych przy opracowaniu urządzeń kontroli ciśnieniowej, spełniających nowoczesne wymogi i wreszcie opracowań właściwych technologii montażu linii kablowych oraz metod pomiarów i lokalizacji uszkodzeń. Artykuł ma na celu pewne usystematyzowanie znanych wiadomości, zebranie informacji i wzorów obliczeniowych, pozwalających na wprowadzenie pojęć i obliczeń techniki pneumatycznej, zastosowanej do telekomunikacyjnych linii kablowych.

Ważność tych zagadnień wbrew pozorom wcale nie zmalała po uruchomieniu produkcji nowoczesnych kabli telekomunikacyjnych, a przeciwnie - zagadnienia kontroli ciśnieniowej stały się palącą potrzebą techniki kablo-

wej i to zarówno dla kabli o powłokach metalowych jak i dla kabli o powłokach polietylenowych, wyposażonych w metalowe zapory przeciwwilgociowe. Kontrola ciśnieniowa w znacznym stopniu zwiększa niezawodność linii; počawszy od chwili ich wyprodukowania, zmontowania w linię oraz w ciągu całego, wieloletniego okresu eksploatacji.

Jednym z ważniejszych wniosków z zawartych tu rozważań jest zaniechanie wymagania całkowitej szczelności samych kabli a także zmontowanych linii. Z wyprowadzonych jednak wzorów i zależności wynika stosunkowo wąski zakres tolerancji, zmuszający do ustalenia dokładnych granic dopuszczalnych i do ścisłego przestrzegania przyjętych wymagań. Tylko takie ustanowienie przepisów w tym zakresie zapewni skuteczną i ekonomiczną kontrolę ciśnieniową, nie zmniejszając poniżej rozsądnych granic skuteczności zabezpieczenia linii. Do tego celu jest oczywiście niezbędne posiadanie wiarygodnych danych o parametrach pneumatycznych produkowanych kabli, niezbędne więc będzie wykonanie wielu pomiarów, które określą te parametry dla każdego typu kabla.

Zależności między różnymi jednostkami

SILĄ	SI N	CGS $\frac{g \cdot cm}{s^2}$	KG
1N	1	10^5	0,101972
$1 \frac{g \cdot cm}{s^2} = 1 \text{ dyna}$ $1 \text{ KG} = 1 \text{ kp}$	10^{-5} 9,80665	1 $9,81 \cdot 10^5$	$1,01972 \cdot 10^{-6}$ 1
$1 \text{ lbf} = \dots \frac{x}{s^2}$ $= 1 \text{ lb} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$	4,44822	$4,4482 \cdot 10^5$	0,453592
Przykłady: 5 kg \approx 49,03 N; 20 N \approx 2,04 kg			

x/ Miara angielska 1 funt siły.

CISNIENIE	Pa	hPa	kPa	MPa	$\frac{kg}{cm^2}$	mbar
$1 \text{ Pa} = 1 \frac{N}{m^2}$	1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	10^{-2}
1 hPa	10^2	1	10^{-1}	10^{-4}	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	1
1 kPa	10^3	10	1	10^{-3}	$1,0197 \cdot 10^{-2}$	10
1 MPa	10^6	10^4	10^3	1	10,1972	10^4
$1 \text{ at} = 1 \frac{kg}{cm^2}$	$9,81 \cdot 10^4$	$9,81 \cdot 10^2$	98,0665	$9,81 \cdot 10^{-2}$	1	$9,81 \cdot 10^2$
1 mbar	10^2	1	10^{-1}	10^{-4}	$1,0197 \cdot 10^{-3}$	1
$1 \text{ psi} = 1 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \times /$	$6,8948 \cdot 10^3$	68,9476	6,8948	$6,8948 \cdot 10^{-3}$	$7,0307 \cdot 10^{-2}$	68,9476

Przykłady: 50 kPa \approx 0,51 kg/cm²; 0,6 kg/cm² \approx 58,8 kPa

600 mbar = 60 kPa = 600 hPa

0,0001 MPa = 0,1 kPa = 1 mbar \approx 0,00102 kg/cm²

x/ Miara angielska /funt siły na cal kwadratowy/

OPÓR PNEUMATYCZNY	ξ	Lo
$1 \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}} = 1\xi$	1	$2,83255 \cdot 10^{-9}$
1 Lo	$0,35304 \cdot 10^9$	1
Przykłady: $5 \text{ G}\xi \approx 14,16 \text{ Lo}$; $3 \text{ Lo} \approx 1,06 \text{ G}\xi = 1,06 \cdot 10^9 \xi$		

POJEMNOŚĆ PNEUMATYCZNA	$\frac{\text{kg}}{\text{Pa}}$	Po
$1 \frac{\text{kg}}{\text{Pa}} = 1\text{Po}$	1	$9,80665 \cdot 10^4$
1 Po	$1,01972 \cdot 10^{-5}$	1
Przykłady: $0,1 \text{ g/Pa} = 10^{-4} \text{ kg/Pa} \approx 9,81 \text{ Po}$ $0,5 \text{ Po} \approx 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/Pa} = 5,1 \text{ mg/Pa}$		

STRUMIEN PRZEPŁYWU GAZU	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\frac{\text{mg}}{\text{s}}$	$\frac{\text{g}}{\text{h}}$	dla powietrza $\frac{\text{dm}^3 \text{ x/}}{\text{h}}$	dla azotu $\frac{\text{dm}^3 \text{ x/}}{\text{h}}$
$1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	1	10^6	$3,6 \cdot 10^6$	$2,988083 \cdot 10^6$	$3,0893902 \cdot 10^6$
$1 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$	10^{-6}	1	3,6	2,988083	3,0893902
$1 \frac{\text{g}}{\text{h}}$	$0,27778 \cdot 10^{-6}$	0,27778	1	0,830023	0,85816
dla powietrza x/ $1 \frac{\text{dm}^3}{\text{h}}$	$0,33466 \cdot 10^{-6}$	0,33466	1,2047858	1	x
dla azotu x/ $1 \frac{\text{dm}^3}{\text{h}}$	$0,323688 \cdot 10^{-6}$	0,323688	1,165278	x	1

Przykłady: $0,5 \text{ kg/s} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ mg/s} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ g/h}$; $5 \text{ dm}^3/\text{h}$ powietrza $\approx 6,02 \text{ g/h}$
 $1 \text{ g/s} \approx 3 \text{ m}^3/\text{h}$ powietrza
 $3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s} = 3 \text{ mg/s} \approx 8,96 \text{ dm}^3/\text{h}$ powietrza $\approx 9,27 \text{ dm}^3/\text{h}$ azotu.

x/h temperaturze $20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$ oraz przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym 1 at /760 mmHg/

Sprawdzenie rozwiązania równania różniczkowego

Dla sprawdzenia rozwiązania /37/ równania różniczkowego /35/ wprowadźmy pewne oznaczenia upraszczające zapis:

Rozwiązanie równania zapiszemy:

$$p(x, t) = C_2 + C_1 G(z) \quad /2.1/$$

$$G(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dz \quad /2.2/$$

$$z = \frac{A}{\sqrt{2}} x \cdot t^{-1/2}$$

gdzie:

$$C_1 = p_1 - p_2 \quad /2.3a/$$

$$C_2 = p_2 \quad /2.3b/$$

$$A = \sqrt{\frac{R_0 \gamma}{P_0}}$$

Wówczas równanie /33/ przybierze postać:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = A^2 \frac{\partial p}{\partial t}$$

Lewą stronę tego równania otrzymamy dwukrotnie różniczkując /2.1/:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = C_1 \frac{\partial G}{\partial x} = C_1 \frac{\partial G}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x}$$

Ponieważ różniczka całki względem argumentu całkowania daje funkcję podcałkową, stąd:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = C_1 \cdot e^{-z^2/2} \cdot \frac{A}{\sqrt{2}} \cdot t^{-1/2} = \frac{AC_1}{\sqrt{2}} t^{-1/2} \cdot e^{-z^2/2}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{AC_1}{\sqrt{2}} t^{-1/2} e^{-z^2/2} \cdot /-z/ \cdot \frac{A}{\sqrt{2}} t^{-1/2} = \\
 &= -C_1 \left(\frac{A}{\sqrt{2}} \right)^3 x \cdot e^{-z^2/2} \quad /2.4/
 \end{aligned}$$

Prawa strona równania będzie określona przez:

$$\begin{aligned}
 A^2 \frac{\partial p}{\partial t} &= A^2 C_1 \frac{\partial G}{\partial t} = A^2 C_1 \frac{\partial G}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = \\
 &= A^2 C_1 e^{-z^2/2} \cdot \left(-\frac{A}{2\sqrt{2}} x t^{-3/2} \right) = \\
 &= -C_1 e^{-z^2/2} \cdot \frac{A^3}{2\sqrt{2}} t^{-3/2} \cdot x = \\
 &= -C_1 \left(\frac{A}{\sqrt{2}} t^{-1/2} \right)^3 \cdot x \cdot e^{-z^2/2} \quad /2.5/
 \end{aligned}$$

a więc lewa strona równania /2.4/ równa jest tożsamościowo prawej stronie /2.5/, co było do okazania.

Podstawienie do /2.1/ i /2.2/ warunków brzegowych podanych w 2.4 pozwala na określenie stałych C_1 i C_2 jak podano wzorami /2.3a i b/.

WYKAZ LITERATURY

1. PN-76/8984-26. Kontrola ciśnieniowa kabli telekomunikacyjnych. System z automatycznym dopełnianiem gazu. Ogólne wymagania i badania.
2. Fritzsche W.: Probleme der Überwachung von Weitnetzkabeln mit Druckgas. Mitteilungen aus IPF, 1974, No 1, s. 16-20.
3. Jourdan F., Tocaven J.L.: Pressurisation des câbles du réseau local. L'écho des Recherches, 1980, No 10, s. 25-34.
4. Kuntze A.: Grundsätze zur pneumatischen Überwachung von Weitnetzkabeln. Mitteilungen aus IPF, 1979, No 2, s. 22-24.



11111111