ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

P.3351/04

Stanisław SZWEDA

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ SPOWODOWANE DYNAMICZNYM ODDZIAŁYWANIEM GÓROTWORU

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Gliwice 2004

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1648

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA (1) w Gliwicach
P. 3351/04

Stanisław SZWEDA

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ SPOWODOWANE DYNAMICZNYM ODDZIAŁYWANIEM GÓROTWORU

Gliwice 2004

Opiniodawcy

Prof. dr hab. inż. Władysław KONOPKO
Prof. dr inż. Włodzimierz SIKORA

Kolegium redakcyjne

Redaktor naczelny – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ
Redaktor działu – Prof. dr hab. inż. Franciszek PLEWA
Sekretarz redakcji – Mgr Elżbieta LEŚKO

Redakcja

Mgr Anna BŁAŻKIEWICZ

Redakcja techniczna

Alicja NOWACKA

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

© Copyright by
Stanisław SZWEDA
Gliwice 2004

P.176/04

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ UŻYWANYCH W PRACY **9**

1. WPROWADZENIE **13**

2. UZASADNIENIE CELOWOŚCI PODJĘCIA TEMATU PRACY **16**

2.1. Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej w świetle teorii opisujących zjawiska dynamiczne w górotworze 16

2.2. Identyfikacja obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej na podstawie analizy uszkodzeń jej podzespołów 25

2.3. Badania dołowe obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej . 28

3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY **35**

4. METODA IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ **39**

4.1. Wyznaczenie zwrotu początkowego obciążenia dynamicznego sekcji 39

4.2. Metoda wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji działające od stropu 43

4.2.1. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu na stropnicę sekcji 44

4.2.2. Wyznaczanie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji 46

4.3. Metoda wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji działające od spągu 49

4.3.1. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu 49

4.3.2. Wyznaczanie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji 50

5. BADANIA OBCIĄŻENIA SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ W WARUNKACH DYNAMICZNEGO ODDZIAŁYWANIA GÓROTWORU **52**

5.1. Metodyka postępowania badawczego 52

5.2. Układ pomiarowy 55

5.3. Charakterystyka miejsca i obiektu badań 59

5.4. Analiza stanu utrzymania stropu wyrobiska w miejscu badań 65

5.5. Przebieg badań 68

6. DYNAMICZNE ODDZIAŁYWANIE GÓROTWORU NA SEKCJĘ OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ W ŚWIETLE WYNIKÓW BADAŃ PROWADZONYCH W WYROBISKACH ŚCIANOWYCH 80

6.1. Parametry charakteryzujące wypadkową siłę w stojakach 80

6.1.1. Rodzaj obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej ... 82

6.1.2. Typ przebiegu czasowego siły w stojakach 85

6.1.3. Maksymalna wartość siły w stojakach 87

6.1.4. Średnie tempo przyrostu siły w stojakach 93

6.1.5. Wpływ strzelań wykonywanych w ścianie oraz samoistnych wstrząsów górotworu towarzyszących obciążeniu dynamicznemu sekcji, działającemu od stropu, na zmiany siły w stojakach 95

6.1.6. Wpływ współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem w warunkach obciążenia statycznego na zmiany siły w stojakach spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu 97

6.1.7. Gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach 101

6.2. Energia sprężysta przejmowana przez stojaki podczas obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej 107

6.2.1. Metoda oszacowania energii sprężystej przejętej przez stojaki 107

6.2.2. Energia sprężysta przejęta przez stojaki a energia fali sejsmicznej w miejscu wykonywania pomiarów obciążenia sekcji 109

6.2.3. Oszacowanie masy bryły stropowej działającej na sekcję oraz wartości parametrów charakteryzujących zaciskanie wyrobiska w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu 113

6.3. Przyspieszenie stropnicy 117

6.3.1. Parametry charakteryzujące przebieg czasowy sygnału przyspieszenia stropnicy 117

6.3.2. Wyznaczanie częstości własnych i współczynników tłumienia sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu 119

6.4. Podsumowanie 123

7. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ 129

7.1. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowych rozpatrywanych modeli sekcji obudowy zmechanizowanej 129

7.1.1. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu 130

7.1.2. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu 135

7.1.3. Wpływ transmitancji widmowej modelu sekcji na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej 139

7.2. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od stropu 143

7.3. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od spągu 150

7.4. Podsumowanie 154

8. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE 156

LITERATURA 160

ZAŁĄCZNIK 171

WYBRANE PRZYKŁADY SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ODDZIAŁYWANIA OBCIĄŻENIA DYNAMICZNEGO NA SEKCJĘ OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ 173

Z.1. Symulacja dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję od stropu 173

Z.2. Symulacja dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję od spągu 177

Streszczenie 181

CONTENTS

LIST OF MAJOR DESIGNATIONS USED IN THE PAPER **9**

1. INTRODUCTION **13**

2. MOTIVES AND THE PURPOSE OF DEALING WITH THE SUBJECT MATTER OF THE PAPER **16**

2.1. Dynamic load acting on a powered roof support unit in view of theories which describe dynamic phenomena occurring in the rock body 16

2.2. Identification of dynamic load acting on a powered roof support unit based on analysing of failures of subassemblies of the support unit 25

2.3. Underground testing of dynamic load of a powered roof support unit 28

3. OBJECTIVE, PROPOSITION AND SCOPE OF THE PAPER **35**

4. A METHOD FOR IDENTIFYING OF PARAMETERS CHARACTERIZING DYNAMIC LOAD ACTING ON A POWERED ROOF SUPPORT UNIT **39**

4.1. Determining of a sense of the initial dynamic load acting on a support unit ... 39

4.2. A method for determining of parameters that characterize dynamic load acting on a support unit from the roof 43

4.2.1. A physical model of the powered roof support unit subjected to dynamic action of the rock body exerted on a canopy of the support unit 44

4.2.2. Determining of spectral density of power of the dynamic load acting on a support unit 46

4.3. A method for determining of parameters that characterize dynamic load acting on a support unit from the floor 49

4.3.1. A method for determining of parameters that characterize dynamic load acting on a support unit from the floor 49

4.3.2. Determining of spectral density of power of the dynamic load acting on a support unit 50

5. TESTING OF LOAD ACTING ON A POWERED ROOF SUPPORT UNIT UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC ACTION OF THE ROCK BODY **52**

5.1. Methodology of testing procedure 52

5.2. Measuring system 55

5.3. Characteristics of the site and object of tests 59

5.4. Analysis of the state of roof maintenance on the site of tests 65

5.5. Course of tests 68

6. DYNAMIC ACTION OF THE ROCK BODY ON A POWERED ROOF SUPPORT UNIT IN THE LIGHT OF TESTS CONDUCTED ON LONGWALL FACES **80**

6.1. Parameters characterizing the resultant force in legs 80

6.1.1. Kind of dynamic load acting on a powered roof support unit 82

6.1.2. Type of the time course of force in legs 85

6.1.3. Maximal value of force in legs 87

6.1.4. Average rate of force increase in legs 93

6.1.5. Effect of blasting applied in a longwall face and of spontaneous bumps in the rock body associated with dynamic load acting on a support unit from the roof on the variation of force in legs 95

6.1.6. Effect of the cooperation of a powered roof support unit with the rock body under conditions of static load on the variation of force in legs due to dynamic load acting on a support unit from the roof 97

6.1.7. Spectral density of power of force in legs 101

6.2. Elastic strain energy taken up by legs during dynamic load acting on support unit 107

6.2.1. A method for estimating the elastic strain energy taken up by legs 107

6.2.2. Elastic strain energy taken up by legs versus energy of a seismic wave on the site of measuring of load acting on a support unit 109

6.2.3. Estimation of mass of the roof rock block acting on a support unit and of values of parameters characterizing the convergence of an underground working under conditions of dynamic action of the rock body 113

6.3. Canopy acceleration 117

6.3.1. Parameters characterizing the time course of a signal of canopy acceleration 117

6.3.2. Determining of natural frequencies and of damping coefficients of a support unit exposed to dynamic action of the rock body 119

6.4. Recapitulation 123

7. IDENTIFICATION OF PARAMETERS THAT CHARACTERIZE DYNAMIC LOAD ACTING ON A POWERED ROOF SUPPORT UNIT **129**

7.1. Sensitivity analysis of the spectral transmittances of models of a powered roof support unit under consideration 129

7.1.1. Sensitivity analysis of the spectral transmittance of a model of a powered roof support unit exposed to dynamic action of the rock body coming from the roof 130

7.1.2. Sensitivity analysis of the spectral transmittance of a model of a poweredhroof support unit exposed to dynamic action of the rock body coming from the floor 135

7.1.3. Effect of the spectral transmittance of a model on spectral density ofhpowerhof the dynamic load acting on a support unit 139

7.2. Spectral density of power of the dynamic load acting on a powered roof supporthunit from the roof 143

7.3. Spectral density of power of the dynamic load acting on a powered roof support unit from the floor 150

7.4. Recapitulation 154

8. CONCLUSIONS AND FINAL REMARKS 156

REFERENCES 160

ANNEXE 171

SELECTED EXAMPLES OF COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC LOAD ACTING ON A POWERED ROOF SUPPORT UNIT 173

Z.1. Simulation of dynamic action of the rock body on a support unit coming from the roof 173

Z.2. Simulation of dynamic action of the rock body on a support unit coming from the floor 177

Abstract 185

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ UŻYWANYCH W PRACY

A_s – pole powierzchni stropnicy,

$A(z^{-1})$ – wielomian modelu AR,

$A_{r1}, \ldots, A_{rdA}$ – współczynniki wielomianu modelu AR sygnału przyspieszenia,

$a(i)$ – wartość sygnału przyspieszenia w chwilach $i = 0, 1, \ldots$,

$\hat{a}(i|i\text{-}1)$ – jednokrokowa predykcja sygnału przyspieszenia,

a_{max} – maksymalne przyspieszenie stropnicy zarejestrowane w trakcie obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,

a_o – początkowe przyspieszenie stropnicy,

b – podziałka sekcji obudowy zmechanizowanej,

b_r – współczynnik tłumienia modelu sekcji obudowy zmechanizowanej; $r = 1, 2$,

c_r – współczynnik sprężystości modelu sekcji obudowy zmechanizowanej; $r = 1, 2$,

c_s – współczynnik sprężystości stojaka,

dA – stopień wielomianu modelu AR sygnału przyspieszenia,

E – energia wstrząsu górotworu,

$E_{r,s}$ – energia poprzecznej fali sejsmicznej przejętej przez sekcję obudowy,

$E_{r,p}$ – energia podłużnej fali sejsmicznej przejętej przez sekcję obudowy,

E_s – energia sprężysta przejęta przez stojaki w trakcie obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,

e_w – średni współczynnik ściśliwości emulsji olejowo–wodnej,

$e(i)$ – biały szum o zerowej wartości oczekiwanej i znanej wariancji S_e,

F – siła w stojakach,

$\mathcal{F}(s)$ – transformata Laplace'a siły w stojakach,

F_s – siła w stojaku,

F_o – wartość siły w stojakach równoważąca obciążenie statyczne wyrobiska,

F_m – maksymalna wartość siły w stojakach w trakcie rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji,

F_r – wartość siły w stojakach przy ciśnieniu roboczym,

$F_{st,k}$ – końcowa siła statyczna w stojakach – wartość siły w stojakach po zakończeniu dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej,

$F_{st,p}$ – początkowa siła statyczna w stojakach – wartość siły w stojakach przed dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej,

F_w – wartość siły w stojakach przy ciśnieniu wstępnym,

f_N – górna częstotliwość graniczna sygnału pomiarowego,

f_s – częstotliwość próbkowania sygnału analogowego,

g – przyspieszenie ziemskie,

g_n – wskaźnik nośności stropu [3],

h – wysokość ściany,

j – liczba urojona – $j^2 = -1$,

K_d – współczynnik przyrostu obciążenia,

l_c – wysokość słupa cieczy pod tłokiem,

m – współczynnik regresji liniowej,

m_1 – zredukowana masa sekcji,

m_2 – masa bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu,

N_p – liczba próbek sygnału przyspieszenia uwzględniona w algorytmie FFT,

n_k – współczynnik redukcyjny podporności sekcji [7],

p – wartość średnia ciśnienia w przestrzeniach roboczych stojaków,

P – średnia jednostkowa podporność obudowy; [MN/m] [3],

$P_f(t)$ – obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, działające od spągu,

$\mathcal{P}_f(s)$ – transformata Laplace'a obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, działającego od spągu,

$P_z(t)$ – obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, działające od stropu,

$\mathcal{P}_z(s)$ – transformata Laplace'a obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, działającego od stropu,

P_r – podporność robocza sekcji obudowy zmechanizowanej – reakcja sekcji obudowy, prostopadła do stropu, występująca przy ciśnieniu roboczym w stojakach [134],

P_{st} – podporność sekcji obudowy zmechanizowanej – występująca przy ciśnieniu statycznym w stojakach,

P_{wst} – podporność wstępna sekcji obudowy zmechanizowanej – występująca przy nominalnym ciśnieniu wstępnym w stojakach,

Q – obciążenie statyczne wyrobiska; [MN/m], [3],

Q_j – jednostkowe obciążenie wyrobiska ($Q_j = Q + Q_t$); [MN/m],

Q_t – dodatkowe obciążenie wyrobiska w ścianach zagrożonych wstrząsami górotworu; [MN/m], za [3],

R_c – wytrzymałość skał stropowych na ściskanie,

r – odległość ogniska wstrząsu od miejsca wykonywania pomiarów obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej; [m],

r_z – promień zewnętrzny cylindra stojaka,

r_w – promień wewnętrzny cylindra stojaka,

$S_a(\omega)$ – gęstość widmowa mocy sygnału przyspieszenia stropnicy,

$S_F(\omega)$ – gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach,

$S_{Pf}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od spągu,

$S_{Pz}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od stropu,

$S_z(t)$ – siła zewnętrzna działająca na sekcję obudowy zmechanizowanej, zmienna w czasie,

T_o – długość przedziału czasowego sygnału pomiarowego poddanego analizie harmonicznej,

t – czas,

t_n – czas narastania obciążenia stojaka,

t_o – początkowa chwila czasowa obciążenia dynamicznego sekcji,

$w_{F,n}$ – średnie tempo przyrostu siły w stojakach; [kN·s^{-1}],

$w_{F,n,r}$ – średnie tempo przyrostu siły w stojakach podczas ich rozpierania; [kN·s^{-1}],

$w_{F,n,r,max}$ – maksymalna wartość średniego tempa przyrostu siły w stojakach podczas ich rozpierania; [kN·s^{-1}],

$y_1(t)$ – pionowe przemieszczenie masy m_1 modelu sekcji,

$Y_1(s)$ – transformata Laplace'a pionowego przemieszczenia masy m_1 modelu sekcji,

$y_2(t)$ – pionowe przemieszczenie masy m_2 modelu sekcji,

$Y_2(s)$ – transformata Laplace'a pionowego przemieszczenia masy m_2 modelu sekcji,

z^{-1} – operator jednokrokowego opóźnienia,

α – kąt pochylenia stojaków; [°],

Δt – okres próbkowania sygnału pomiarowego,

$\Delta\omega$ – rozdzielczość gęstości widmowej mocy sygnału pomiarowego,

δa – poziom szumu sygnału przyspieszenia,

δF – poziom szumu sygnału siły,

δ_r – współczynnik tłumienia modalnego, odniesiony do częstości własnej $\omega_{0,r}$; $r = 1, 2, ..., n$,

δ_z^2 – wariancja obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,

$\varepsilon_{r,p}$ – gęstość energii sejsmicznej fali podłużnej w miejscu pomiaru obciążenia sekcji,

$\varepsilon_{r,s}$ – gęstość energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru obciążenia sekcji,

λ_r – pierwiastki równania charakterystycznego modelu AR sygnału przyspieszenia stropnicy; 1, 2, ..., n,

$\Phi_{12,f}(j\omega)$ – transmitancja widmowa modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu,

$(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$ – wartość średnia modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu, wyznaczona na podstawie wyników pomiarów dołowych,

$\Phi_{1,z}(j\omega)$ – transmitancja widmowa modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu,

$(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ – wartość średnia modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu, wyznaczona na podstawie wyników pomiarów dołowych,

ρ – współczynnik korelacji zmiennych losowych w populacji generalnej,

$\hat{\rho}$ – estymator współczynnika korelacji zmiennych losowych wyznaczony z próby obejmującej wyniki pomiarów obciążenia sekcji obudowy,

Ψ – współczynnik krotności energii sprężystej stojaków,

ω – częstość kołowa,

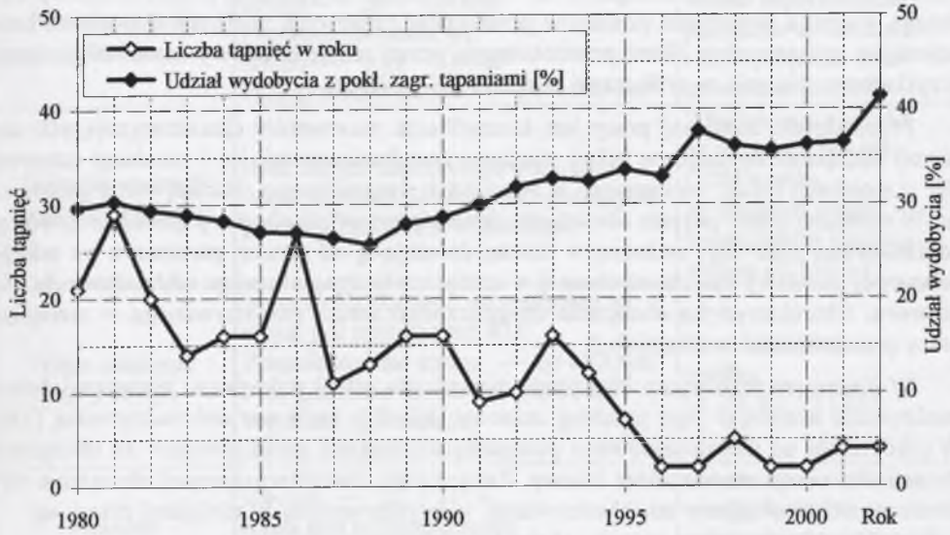
$\omega_{0,r}$ – częstość własna (in. częstość drgań własnych nietłumionych); r = 1, 2, ..., n,

ω_r – częstość drgań własnych tłumionych ; r = 1, 2, ..., n,

ω_k – granica obszaru oznaczoności funkcji gęstości widmowej mocy siły w stojakach.

1. WPROWADZENIE

Potrzeba podjęcia prac nad wyznaczaniem obciążenia działającego na sekcję ścianowej obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu wynika z konieczności zaprojektowania nowych typów obudowy zmechanizowanej spełniających wymagania niezawodnej pracy w wysoko wydajnych kompleksach ścianowych przeznaczonych do pracy w wyrobiskach zagrożonych tąpaniami. Jakkolwiek liczba tąpnięć odnotowanych w latach ubiegłych zmniejsza się, to równocześnie, pomimo spadku całkowitego wydobycia węgla, rośnie udział wydobycia węgla z przodków ścianowych zagrożonych tąpaniami [54]. Na rys. 1.1 przedstawiono wykres liczby tąpnięć zarejestrowanych w kopalniach węgla kamiennego na tle procentowego udziału wydobycia węgla ze ścian zagrożonych tąpaniami [46, 47, 48, 49, 66].



Rys. 1.1. Liczba tąpnięć odnotowana w przemyśle węglowym w latach 1980 - 2002 oraz udział wydobycia ze ścian zagrożonych tąpaniami (wg [53, 54, 66])

Fig. 1.1. Number of rock bumps as recorded by the coal industry in the years 1980 - 2002 and a proportion of the coal output extracted from longwall faces exposed to bumps (acc. to [53, 54, 66])

Pomimo malejącej liczby tąpnięć w kolejnych latach, tematyka podjęta w niniejszej pracy jest w dalszym ciągu aktualna ze względu na stosunkowo wysoki udział procentowy wydobycia węgla ze ścian zagrożonych tąpaniami.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami tąpnięcie definiuje się jako zjawisko dynamiczne spowodowane wstrząsem górotworu, w wyniku którego wyrobisko lub jego odcinek uległo gwałtownemu zniszczeniu lub uszkodzeniu, w następstwie czego nastąpiła całkowita lub częściowa utrata jego funkcjonalności lub bezpieczeństwa jego użytkowania [139]. Możliwość zniszczenia lub uszkodzenia obudowy wyrobiska wskutek tąpnięcia akcentowano wyraźniej definiując tąpnięcie jako zjawisko gwałtownego wyładowania energii sprężystej nagromadzonej w górotworze, powodujące zniszczenie struktury skał stropu, spągu lub

pokładu z równoczesnym dynamicznym ich przemieszczeniem do wyrobiska, co może powodować zniszczenie lub uszkodzenie obudowy wyrobiska lub maszyn i urządzeń [140].

W ścianach zagrożonych tąpaniami, oprócz tąpnięć obserwuje się również inne przypadki dynamicznego oddziaływania górotworu na obudowę wyrobiska. Wieloletnie obserwacje i pomiary w wyrobisku umożliwiły wyróżnienie 7 rodzajów dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję, zestawionych w tabeli 1.1.

Wielkości fizyczne ujęte w tabeli 1.1 mają w większości wypadków szacunkowy charakter. Opisują one głównie skutki zjawisk dynamicznych obserwowane w wyrobisku. Wyznaczenie sił zewnętrznych działających na sekcję oraz sił przenoszonych przez jej elementy na podstawie wyników pomiarów parametrów opisujących skutki dynamicznego oddziaływania górotworu wymaga przyjęcia dodatkowych założeń upraszczających dotyczących głównie sztywności sekcji i skał otaczających. Precyzyjniejsze wyznaczenie sił działających na sekcję, a szczególnie sił wewnętrznych, na przykład przenoszonych przez stojaki, wymaga wykonania pomiarów przebiegów czasowych wielkości fizycznych bezpośrednio związanych z siłami przenoszonymi przez sekcję obudowy zmechanizowanej, przykładowo ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaków.

Przedmiotem niniejszej pracy jest identyfikacja parametrów charakteryzujących zarówno obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, jak i przebiegi czasowe siły w stojakach sekcji, występujące w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. W niniejszej pracy **pojęcie *obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej* zdefiniowano jako siłę, zmienną w czasie, działającą od strony górotworu na sekcję ścianowej obudowy zmechanizowanej w następstwie dynamicznego oddziaływania górotworu.** Charakterystykę obciążenia dynamicznego sekcji, rozpatrywanego w niniejszej pracy przedstawiono w rozdziale 3.

W literaturze przedmiotu obciążenie dynamiczne sekcji traktowano zazwyczaj deterministycznie określając jego przebieg czasowy [16, 83], bądź wartość maksymalną [18]. W odróżnieniu od dotychczasowego podejścia, w niniejszej pracy przyjęto, że obciążenie dynamiczne sekcji ma charakter losowy. Parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, identyfikowanymi w niniejszej pracy, są:
- gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji,
- wariancja obciążenia dynamicznego sekcji.

W niniejszej pracy podstawowym źródłem danych służących do identyfikacji parametrów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej są wyniki pomiarów wykonanych w wyrobisku.

Tabela 1.1

Charakterystyka rodzajów dynamicznego oddziaływania górotworu na obudowę

Rodzaj dynamicznego oddziaływania górotworu	Parametry fizyczne określające oddziaływanie górotworu	Uwagi
Drgania stropu	Amplituda przemieszczenia — 0,03 ÷ 21 mm Częstotliwość drgań — 3 ÷ 14 Hz Maksymalna prędkość osuwania stropu — 0,4 ms^{-1}	Oszacowano korzystając z danych zebranych w GZW [83]
Przemieszczenia stropu	Przemieszczenie stropu — 20 ÷ 550 mm Prędkość osuwania się stropu — 0,05 ÷ 2,0 ms^{-1} Przyspieszenie stropu — 10 ÷ 980 ms^{-2}	Dane te potwierdzają wyniki pojedynczych pomiarów w Czechach i RPA [15] oraz oszacowania w [51, 59]
Udar skruszonych i wyrzuconych skał	Brak danych umożliwiających oszacowanie wartości parametrów opisujących przebieg zjawiska w wyrobisku	Z badań tego zjawiska na modelach pokładu [128] wynika, że prędkość węgla wyrzucanego z ociosu wynosi do 150 ms^{-1}
Nagłe osunięcie bryły stropu	Masa bloku skalnego przypadająca na stojak jest mniejsza niż 40 t. Przemieszczenie stropu — do 600 mm Przyspieszenie stropu — ok. 10 ms^{-2} Prędkość osuwania się stropu — do 1,0 ms^{-1}	Dane szacunkowe według: [8, 40, 41, 73 i 83]
Łamanie zwięzłego stropu	Energia — $10^6 \div 10^8$ J Masa skał uczestniczących w tąpnięciu — do $9 \cdot 10^6$ t Przemieszczenia stropu — do 10 cm	Oszacowano analizując energię sprężystą zakumulowaną w modelu stropu w postaci zginanej belki [59]
Strzelanie wstrząsowe	Maksymalny przyrost obciążenia przenoszonego przez obudowę — 15 % początkowego obciążenia statycznego	Dane szacunkowe [19, 40, 41]
Przemieszczenia spągu	Wypiętrzenie spągu — ponad 10 cm. Współczynnik dynamiczny — 1,8 Czas narastania obciążenia — 7 ms	Oszacowano korzystając ze wstępnych wyników pomiarów [107] i analizy skutków tąpnięć [86].

2. UZASADNIENIE CELOWOŚCI PODJĘCIA TEMATU PRACY

Tąpania i inne zjawiska dynamiczne występujące w górotworze podczas eksploatacji górniczej są przedmiotem wielu prac badawczych, np.: [6, 38, 43, 45, 53, 64]. Jednym z problemów poruszanych w tych pracach jest zagadnienie wyznaczania obciążenia działającego na sekcję obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Dane umożliwiające określenie parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej lub obciążenie jej elementów można uzyskać wykorzystując trzy rodzaje źródeł informacji:

- teorie opisujące zjawiska dynamiczne w górotworze,
- analizę skutków działania obciążenia dynamicznego w postaci uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanych tąpnięciem,
- wyniki pomiarów obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej wykonane w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu.

Poniżej omówiono stan badań nad obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej.

2.1. Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej w świetle teorii opisujących zjawiska dynamiczne w górotworze

Spośród zjawisk wywołujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej najwięcej uwagi poświęcono tąpaniom. Niestety, w wielu opracowaniach dotyczących tąpań zagadnienie wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne obudowy zmechanizowanej podczas tąpnięcia nie jest rozpatrywane, gdyż przedmiotem teorii opisujących tąpania jest przede wszystkim określenie warunków górniczo-geologicznych, w których tąpnięcie może wystąpić. Z kolei wykorzystanie wyprowadzonych zależności teoretycznych do oszacowania wartości obciążenia dynamicznego działającego na sekcję jest bardzo utrudnione z uwagi na założenia upraszczające przyjmowane w rozpatrywanych modelach.

Stosunkowo dużo informacji o obciążeniu dynamicznym działającym na sekcję obudowy zmechanizowanej można uzyskać analizując teorię dopuszczalnego zaciskania stropu wyrobiska, opracowaną przez Bilińskiego [3, 4, 6, 7, 9, 10, 11]. Korzystając z wyników wieloletnich pomiarów i obserwacji dołowych Biliński uzyskał zależności empiryczne pomiędzy obciążeniem jednostkowym wyrobiska (liczonym na 1 m długości ściany) a parametrami charakteryzującymi warunki górniczo-geologiczne panujące w wyrobisku.

Występowanie silnych wstrząsów górotworu podczas ciągłego wybierania pokładu systemem ścianowym Biliński wiąże ze zjawiskiem okresowego ścinania belek utworzonych z mocnych warstw skalnych osiadających nad zrobami pokładu. Warstwy skalne w wyniku ścinania dzielą się na luźne bloki osiadające na warstwach niżej leżących obciążających statycznie sekcję obudowy zmechanizowanej. W przypadku wyrobisk narażonych na występowanie wstrząsów górotworu dodatkowe obciążenie wyrobiska spowodowane wstrząsem górotworu określają zależności [10, 11]:

dla ścian zawałowych:

$$Q_t = n_{tz} \cdot Q \tag{2.1}$$

$$n_{tz} = 1 + \frac{n_{zr}}{0{,}04\left(\frac{H_t}{E}\right)^{0{,}7} + 0{,}04 \cdot H_t + 0{,}5} \tag{2.2}$$

dla ścian z podsadzką hydrauliczną:

$$Q_t = n_{tp} \cdot Q \tag{2.3}$$

$$n_{tp} = 1 + \frac{n_{zr}}{0{,}025\left(\frac{H_t}{E}\right)^{0{,}7} + 0{,}025 \cdot H_t + 0{,}3} \tag{2.4}$$

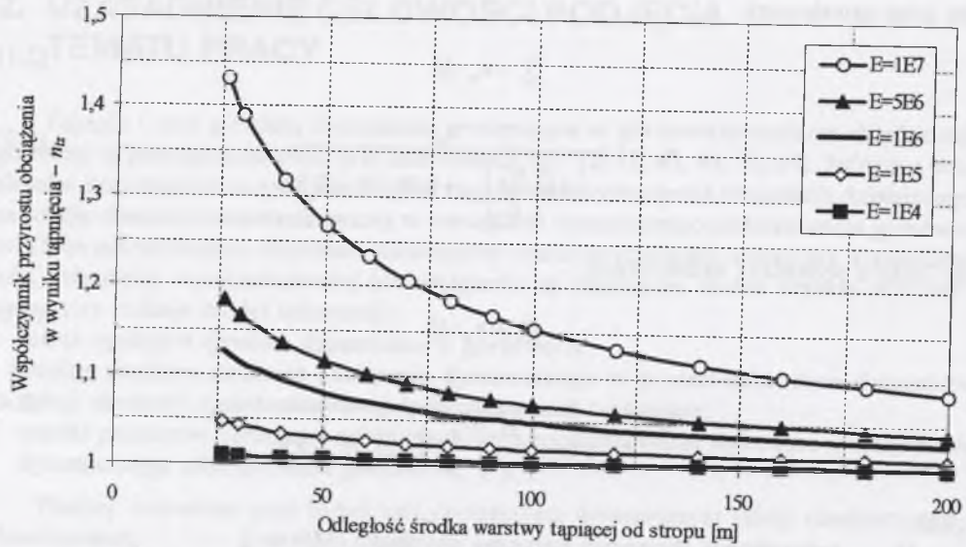
gdzie:

Q – jednostkowe obciążenie statyczne wyrobiska [MN·m^{-1}],
Q_t – dodatkowe obciążenie wyrobiska w ścianach zagrożonych wstrząsami górotworu [MN·m^{-1}],
H_t – odległość środka grubości tąpiącej warstwy skalnej nad wybranym polem do pułapu wyrobiska ścianowego [m],
E – energia wstrząsu [MN·m],
n_{tz} – współczynnik przyrostu obciążenia wyrobiska ścianowego prowadzonego na zawał w wyniku tąpnięcia,
n_{tp} – współczynnik przyrostu obciążenia wyrobiska ścianowego prowadzonego na podsadzkę suchą, w wyniku tąpnięcia,
n_{zr} – współczynnik korygujący dodatkowe obciążenie wyrobiska Q_t w przypadku eksploatacji pokładu na warstwy:
$n_{zr} = 0{,}3 \div 0{,}4$ – w przypadku gdy ściana prowadzona jest pod wybraną górną warstwę pokładu,
$n_{zr} = 1{,}0$ – w pozostałych przypadkach.

Zależność współczynnika n_{tz} od prognozowanej energii wstrząsu oraz odległości środka warstwy tąpiącej od stropu wyrobiska przedstawiono na rys. 2.1.

Z powyższych zależności wynika, że dodatkowe obciążenie wyrobiska spowodowane wstrząsem górotworu jest proporcjonalne do obciążenia statycznego występującego w tym wyrobisku. W obliczeniach wskaźnika nośności stropu – g_n [1], będącego w teorii Bilińskiego miarą stanu utrzymania stropu wyrobiska, uwzględnia się m. in. współczynniki korygujące podporność obudowy w wyrobiskach zagrożonych tąpaniami w zależności od wysuwu rdzeników stojaków [11], czy też rezerwę podporności obudowy zależną od utrzymywanej rozpiętości stropu wyrobiska, prognozowanej energii wstrząsu oraz odległości środka grubości warstwy tąpiącej od pułapu wyrobiska [5]. Korzystając z tych zależności nie można jednak wyznaczyć obciążenia działającego na sekcję obudowy zmechanizowanej w trakcie wstrząsu.

[1] W pracach Bilińskiego wskaźnik nośności stropu oznaczany jest symbolem – g.



Rys. 2.1. Zależność współczynnika zwiększającego obciążenia wyrobiska ścianowego prowadzonego na zawał od energii wstrząsu E i odległości środka grubości warstwy tąpiącej od pułapu wyrobiska

Fig. 2.1. Dependence of a factor increasing the load of a longwall face mined with caving on the bump energy E and on a distance between the centre of a bumping layer thickness and the roof of the working

Stoiński, korzystając z wartości współczynników n_{tz} wyznaczonych przez Bilińskiego oraz zakładając, że sekcja obudowy zmechanizowanej przenosi całe obciążenie wyrobiska, wyznaczył maksymalne obciążenie sekcji z zależności [80]:

$$F_{z,\max} = n_{tz} \cdot Q \cdot b \tag{2.5}$$

gdzie:

- $F_{z,max}$ – maksymalne obciążenie sekcji,
- b – podziałka sekcji obudowy,
- Q – obciążenie statyczne wyrobiska,
- n_{tz} – współczynnik przyrostu obciążenia wyrobiska ścianowego prowadzonego na zawał w wyniku tąpnięcia.

Zakładając następnie, że sekcja jest poprawnie dobrana do warunków naturalnych i technicznych, określono przyrost obciążenia sekcji od obciążenia wstępnego do obciążenia maksymalnego, zwany w [80] siłą dociążającą sekcję

$$F_{z,d} = F_{z,\max} - F_{z,w} = (n_{tz} - k_w) \cdot Q \cdot b \tag{2.6}$$

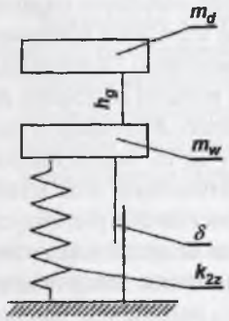
gdzie:

$$k_w = \frac{F_{z,w}}{Q \cdot b} \tag{2.7}$$

- $F_{z,d}$ – siła dociążająca sekcję,
- $F_{z,w}$ – wstępne obciążenie sekcji.

Konsekwencją założeń przyjętych w pracy [80] jest stwierdzenie, że dociążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej maleje ze wzrostem wstępnego obciążenia sekcji.

Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej analizowano w pracy [82] korzystając z modelu fizycznego o jednym stopniu swobody, przedstawionego na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej obciążonej dynamicznie ([82]): m_w – masa skał wstępnie obciążających obudowę odpowiadająca obciążeniu wstępnemu sekcji, m_d – masa skał dociążających sekcję w trakcie wstrząsu, k_{2z} – współczynnik sprężystości sekcji, d – współczynnik tłumienia drgań

Fig. 2.2. Physical model of a powered roof support unit exposed to dynamic load ([82]): m_w – mass of the rock which exerts initial load on the roof support corresponding to a setting load of a support unit, m_d – mass of the rock which exerts additional load on a support unit when a bump is taking place, k_{2z} – coefficient of elasticity of a support unit, d – vibration damping coefficient

Sekcja obudowy zmechanizowanej modelowana jest w postaci nieważkiego elementu sprężystego o współczynniku sprężystości k_{2z}. Przyjęto, że wartość współczynnika tłumienia δ zależy od dwóch czynników:

- działania zaworu upustowego, przedstawionego w postaci uproszczonej zależności empirycznej:

$$\delta_z = \gamma_w \frac{k_s}{S} \frac{Q_z}{p_z}; \ [\mathrm{s}^{-1}] \tag{2.8}$$

gdzie:

- γ_w – ciężar właściwy wody; [N·m^{-3}],
- k_s – współczynnik obliczeniowy, zależny od budowy i sposobu podłączenia zaworu,
- p_z – uśrednione ciśnienie pracy zaworu upustowego, zależne od budowy i nastawy zaworu,
- Q_z – objętościowe natężenie wypływu z zaworu, odpowiadające ciśnieniu p_z,

- tłumienia drgań skał stropowych oszacowanego, przy założeniu że po upływie czasu równego podwojonemu okresowi drgań układu amplituda drgań zmaleje dziesięciokrotnie.

Obciążenie zewnętrzne stanowią ciężary brył o masach m_w i m_d modelujące wstępne obciążenie sekcji i siłę dociążającą.

Zależności opisujące przebieg czasowy siły w stojaku [80,82] wyznaczono przyjmując następujące założenia w modelu przedstawionym na rys. 2.2:

- masa m_d spada swobodnie z przyjętej wysokości h_g,
- częstość drgań własnych tłumionych układu zależy od współczynnika sprężystości stojaka, jego podporności roboczej oraz n_{tz}.

Przebieg czasowy wyznaczony według powyższych założeń, przyjętych przez Stoińskiego, charakteryzuje duża zgodność z wynikami pomiarów sił w stojaku wykonanymi podczas próby obciążania go udarem swobodnie spadającej masy.

Założenia upraszczające, analogiczne do omówionych powyżej, przyjęto również w badaniach wpływu postaci konstrukcyjnej stojaków oraz zaworów upustowych na podatność sekcji [20, 79, 81, 82, 83].

Zagadnienie obciążenia stojaka hydraulicznego poprzez udar masy rozpatrywano również w pracy [120] modelując stojak na gruncie teorii hydrosprężystości.

Teorie opisujące zjawisko tąpnięcia na bazie rozwiązań mechaniki ośrodków ciągłych (np.: Gil [30], Pietuchow [64]) zakładają występowanie w otoczeniu wyrobiska ścianowego strefy górotworu, który uległ uplastycznieniu lub kruchemu zniszczeniu. Korzystając z teorii szczelin Pietuchow wyznaczył szerokość strefy spękań oraz warunki niezbędne do propagacji szczeliny w górotworze. W zależności od wielkości i charakteru deformacji w pokładzie wyróżniono trzy strefy spękań. Poczynając od czoła ściany są to: strefa dużych odkształceń plastycznych pokładu, strefa pokładu w stanie silnie skruszonym oraz strefa pokładu w stanie sprężystym. W następstwie tąpnięcia rosną szerokości dwóch pierwszych stref. Niejednorodnym rozkładem szerokości poszczególnych stref na długości ściany tłumaczy Budirsky [14] przyczyny obserwowanego różnego stopnia zniszczenia sekcji na długości ściany. Z jakościowych analiz charakterystyk odkształceniowo - naprężeniowych poszczególnych stref pokładu przeprowadzonych w [14] nie można jednak oszacować wielkości obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

Wpływ podporności obudowy zmechanizowanej na stateczność stropu uwzględniono również w kryterium wystąpienia tąpnięcia opracowanym przez Zorychtę [130]. Wykorzystanie tego kryterium do wyznaczania parametrów charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej nie jest jednak możliwe bez przyjęcia dodatkowych założeń upraszczających dotyczących rozkładu obciążenia przenoszonego przez pokład i zawał.

Zagadnienie prognozowania obciążenia działającego na sekcję obudowy zmechanizowanej wskutek wstrząsu górotworu rozpatrywano w pracach [18, 43, 131]. Analizując geomechaniczne uwarunkowania występowania wstrząsów wysokoenergetycznych (energia wstrząsu większa od 10^5 J) w górotworze, traktowanym jako warstwowy ośrodek liniowo sprężysty, stwierdzono, że wskutek rozpraszania energii jedynie jej część dociera do wyrobiska [131]. Według Chudka i Zorychty [18] wstrząs górotworu powoduje działanie na caliznę węglową, sekcję obudowy zmechanizowanej i zawał dynamicznego naprężenia pionowego. Wartość tego naprężenia określa wzór:

$$p_d = \sqrt{2 \cdot R_{cw} \cdot A_d} \tag{2.9}$$

gdzie:

p_d – pionowe naprężenie dynamiczne działające na wyrobisko górnicze; [MPa],
R_{cw} – wytrzymałość węgla na ściskanie; [MPa],
A_d – gęstość energii dynamicznej opisującej oddziaływanie wstrząsu, którego ognisko oddalone jest od rozpatrywanego wyrobiska o wartość r; [MN·m^{-1}].

Wartość A_d wyznaczana z zależności empirycznej:

$$A_d = 25{,}7 \cdot \rho_w \left[\frac{\sqrt{\ln A_s}}{r} \right]^{3,1} \cdot \frac{E_w}{R_{cw}} \tag{2.10}$$

gdzie:

ρ_w – gęstość węgla; [t·m^{-3}],
R_{cw} – wytrzymałość węgla na ściskanie; [MPa],
E_w – moduł odkształcenia węgla; [MPa],
A_s – energia wstrząsu; [MN·m],
r – odległość ogniska wstrząsu od wyrobiska; [m].

Rozpatrując wpływ różnych zjawisk dynamicznych na obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej Szuścik [85, 88, 89, 90] wyróżnia cztery następujące przypadki:
- tąpnięcie eksplozyjne węgla z czoła ściany do wyrobiska,
- tąpnięcie eksplozyjne ze spągu węglowego (spodku),
- tąpnięcie eksplozyjne ze spągu,
- nieeksplozyjne tąpnięcie ze stropu.

W odróżnieniu od tąpnięć nieeksplozyjnych powstających w wyniku pękania warstw stropu, tąpnięcia eksplozyjne są spowodowane wystąpieniem „zjawiska tąpania materiału węglowego", opisanego przez Zastawnego [126, 127].

Na podstawie rozważań teoretycznych [87, 92] oraz wyników pomiarów dołowych wykonanych przez Autora niniejszej pracy, a przedstawionych w pracy [107], Szuścik określił następujące parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej:
- współczynnik dynamiczny k_d, definiowany jako stosunek największego obciążenia sekcji do jej obciążenia statycznego,
- czas przyrostu obciążenia – Δt,
- prędkość przyrostu obciążenia, wyznaczaną z zależności:

$$v_t = \frac{k_d - 1}{\Delta t} \tag{2.11}$$

gdzie:

k_d – współczynnik dynamiczny,
Δt – czas przyrostu obciążenia,
v_t – prędkość przyrostu obciążenia.

Określone przez Szuścika [90] wartości wyżej wymienionych parametrów charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowane nieeksplozyjnym tąpnięciem ze stropu, eksplozyjnym tąpnięciem ze spągu i eksplozyjnym tąpnięciem ze spodku zestawiono w tabeli 2.1.

W trakcie badań laboratoryjnych prowadzonych na specjalnym stanowisku badawczym Zastawny [129] określił wartość ciśnienia krytycznego, powyżej którego występuje w danym pokładzie tąpnięcie eksplozyjne z czoła ściany. W trakcie pomiarów realizowanych na modelach pokładu z modelem wyrobiska oszacowano również maksymalny przyrost podporności modelu obudowy [126]. Stwierdzono, że w wyniku tąpnięcia eksplozyjnego z modelu czoła ściany podporność modelu sekcji obudowy zmechanizowanej wzrosła o 15 ÷ 20% w stosunku do podporności przed tąpnięciem. Należy jednak zaznaczyć, że wyniki pomiarów cytowane powyżej dotyczą przyrostu podporności modelu sekcji i mają jedynie jakościowy charakter.

Zagadnienie współpracy obudowy z górotworem w warunkach drgań stropu wyrobiska analizowano w pracach [12, 17, 58]. W pracach [12] i [58] sformułowano kryterium po-

Tabela 2.1

Zestawienie wartości parametrów charakteryzujących według Szuścika obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej

Rodzaj tąpnięcia	Współczynnik dynamiczny	Czas przyrostu obciążenia [s]	Prędkość przyrostu obciążenia [s^{-1}]
Nieeksplozyjne ze stropu	1,20	0,700	0,3
Eksplozyjne ze spągu	1,40	0,300	1,3
Eksplozyjne ze spodku	1,85	0,007	120,0

prawnej współpracy obudowy z górotworem w warunkach drgań stropu – „Obudowa powinna działać na drgający strop z określoną, możliwie stałą siłą, nie dopuszczając ani do rozluzowania czy też rozwarstwienia stropu, ani do utraty kontaktu obudowy ze stropem" [12] – a następnie wyznaczono wymaganą podporność sekcji obudowy zmechanizowanej. Zależy ona od statycznego obciążenia sekcji oraz od amplitudy i częstości własnej stropu [58]. Z rozważań teoretycznych i wyników pomiarów względnego przemieszczenia stropu i spągu wyrobiska wynika, że pierwsza częstość własna stropu wyrobiska ścianowego o wysokości 2 ÷ 2,5 m wynosi [99]:

$$\omega_{0,1} = 70 \div 120 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$$

Podany przedział częstości własnych odpowiada przedziałowi częstotliwości:

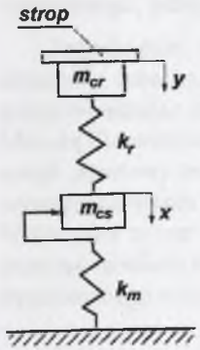
$$11{,}1 \text{ Hz} \le f \le 19{,}1 \text{ Hz} \tag{2.12}$$

gdzie:

$$f = \frac{\omega_{0,1}}{2\pi} \tag{2.13}$$

Nieco niższe częstotliwości drgań stropu rejestrowano podczas drgań górotworu spowodowanych samoistnymi wstrząsami górotworu. Metodę pomiaru drgań konturu wyrobiska za pomocą konwergometru dynamicznego opracował zespół pod kierunkiem Konopko [50, 55]. Stwierdzono, że amplituda drgań konturu wyrobiska rośnie ze wzrostem energii wstrząsu górotworu. Maksymalną amplitudę drgań konturu wyrobiska, wynoszącą np. 15 cm, wyznaczono w przypadku wstrząsu o energii rzędu $5\cdot10^5$ J. Częstotliwość drgań konturu wyrobiska wynosiła 4 ÷ 10 Hz. Nie stwierdzono istotnego wpływu energii wstrząsu na częstotliwość drgań konturu wyrobiska. Ze wzrostem energii wstrząsu rośnie zarówno czas trwania drgań, jak też prędkości i przyspieszenia w ruchu konturu wyrobiska. Wyniki pomiarów przedstawione w [55] wskazują również na istotny wpływ stopnia naruszenia górotworu czy też lokalizacji stref uskokowych na obserwowane drgania górotworu.

Zagadnieniom modelowania obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanego drganiami stropu poświęcone są np. prace [17, 34, 58]. Chudek i Olaszowski [17] opracowali metodę modelowania współpracy obudowy zmechanizowanej ze stropem wyrobiska na przykładzie obudów zmechanizowanych typu OK-1R i FAZOS-12/28-Oz. Przedmiotem modelowania matematycznego są stojaki sekcji obudowy zmechanizowanej. Na rys. 2.3 przedstawiono przykład rozpatrywanego modelu stojaka.



Rys. 2.3. Model o stałych skupionych stojaka obudowy OK–1R: k_m – stała sprężystości medium roboczego (zależna od wysokości sekcji), k_r – stała sprężystości rdzennika, m_{cs} – zredukowana masa tłoka i cieczy w spodniku, m_{cr} – zredukowana masa rdzennika i głowicy stojaka

Fig. 2.3. Discrete model of a support leg OK-1R: k_m – elasticity constant of the working medium (dependent on the height of a support unit), k_r –elasticity constant of inner tube, m_{cs} – reduced mass of piston rod and of liquid in the outer tube, m_{cr} – reduced mass of inner tube and of leg head

Rozpatrując modele stojaków o różnych wymiarach oraz przyjmując różne funkcje opisujące drgania tłumione bądź drgania nietłumione stropu określono: wartość siły oddziaływania obudowy na strop, czas, po którym nastąpi utrata kontaktu obudowy ze stropem i maksymalną szerokość szczeliny pomiędzy stropem a sekcją. Analizując drgania górotworu wywołane energią sejsmiczną stwierdzono [15], że obciążenie dynamiczne wywołane jest w tym przypadku różnicą faz przemieszczeń stropu i spągu. Ze względu na złożony przebieg zjawiska, zwłaszcza w strefie ogniska wstrząsu, sformułowanie zależności opisujących przemieszczenia stropu jest bardzo trudne. Weryfikacja doświadczalna hipotez dotyczących przebiegu obciążenia dynamicznego w strefie ogniska wstrząsu jest również bardzo trudna, gdyż pomimo wieloletnich pomiarów parametrów drgań spowodowanych wstrząsami górotworu liczba rejestracji „in situ", opisujących drgania górotworu w strefie zniszczenia, jest wciąż niewielka [57].

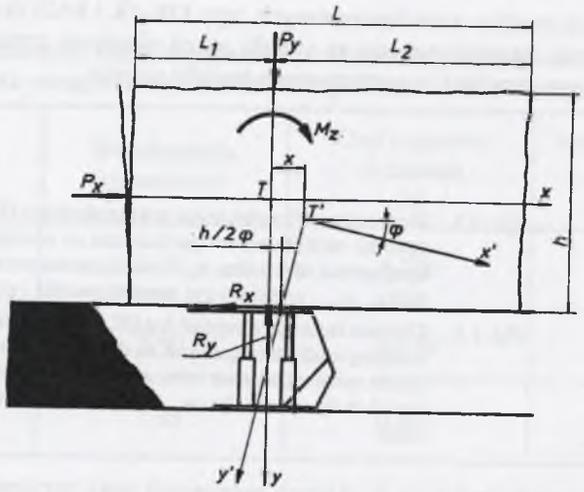
W krajowej i zagranicznej literaturze opracowano skale empiryczne [22] wiążące maksymalne amplitudy prędkości drgań – PPV (peak particle velocity) i rozmiaru zniszczeń (np. skala Downinga i Rozena [57] – patrz tabela 2.2), jednakże jak dotąd nie podjęto próby wykorzystania tych parametrów drgań górotworu do oszacowania obciążeń dynamicznych działających na obudowę.

Przypadek osunięcia bryły stropu bezpośredniego na stropnicę sekcji obudowy analizował S. Budirsky w pracy [16]. Rozpatrywany model fizyczny przedstawiono na rys. 2.4.

Tabela 2.2

Empiryczna skala oceny skutków drgań górotworu według Downinga i Rozena [57]

Stopień zniszczenia wyrobiska	Opis zniszczenia	PPV [mm/s]
I	brak zniszczeń w górotworze	poniżej 200
II	małe zniszczenia (odspojenia i małe szczeliny)	200 ÷ 400
III	wyraźne zniszczenia (duże nowe szczeliny)	powyżej 400



Rys. 2.4. Model fizyczny obciążenia sekcji spowodowanego osunięciem bryły stropu bezpośredniego na stropnicę sekcji [16]

Fig. 2.4. Physical model of load acting on a support unit due to falling of the immediate roof rock block on a canopy of the support unit [16]

Przyjęto, że blok stropu bezpośredniego obciążony jest siłami zewnętrznymi P_x i P_y, których proste działania przechodzą przez środek masy rozpatrywanej bryły usytuowanej nad sekcją obudowy zmechanizowanej. Pomijając ściśliwość masywu oraz zakładając małe przemieszczenia pionowe otrzymano równanie:

$$y = \frac{1}{c_y}\left(m \cdot g - F_{yo}\right)\left(1 - \cos\omega t\right) \tag{2.14}$$

gdzie:

c_y – współczynnik sprężystości sekcji obudowy,
m – masa bloku skalnego obciążającego sekcję,
g – przyspieszenie ziemskie,
F_{yo} – początkowa siła oddziaływania sekcji obudowy na strop,
ω – częstość drgań.

$$\omega = \sqrt{\frac{c_y}{m}} \tag{2.15}$$

Rozpatrując w [16] przykład obudowy PIOMA 25/45-Oz stwierdzono, że osunięcie bloku piaskowca (L = 10 m, h = 10 m, r = 2,5 t·m^{-2}) na sekcję obudowy o maksymalnej wysokości stosowania (odpowiada jej współczynnik sprężystości sekcji c_y = 68 kN·mm^{-1}), oddziałującej na 1 m szerokości stropu siłą F_{yo} = 1970 kN·m^{-1}, której wartość odpowiada ciśnieniu roboczemu w stojakach, powoduje maksymalne przemieszczenie pionowe stropnicy o 15,6 mm. Maksymalną prędkość przemieszczenia stropu oszacowano na 127 mm·s^{-1} Porównywalne prędkości osiadania stropu zarejestrowano w Donbasie [72].

Uderzenia skał tworzących zawał o osłonę mogą doprowadzić do zniszczenia tego elementu [15]. Przykłady analizy tego obciążenia w zakresie obciążeń statycznych zamieszczono również w [19]. Nie oszacowano wartości obciążenia dynamicznego działającego w tym przypadku na sekcję obudowy zmechanizowanej stwierdzając, że zabezpieczenie sekcji przed obciążeniem dynamicznym osłony, spowodowanym udarem brył górotworu naruszonego, polega na właściwym kierowaniu stropem [19].

Zagadnienie wpływu obciążenia dynamicznego na wytężenie podzespołów sekcji obudowy zmechanizowanej rozpatrywano między innymi w pracach [65, 124, 125] przeprowadzając symulacje komputerowe z wykorzystaniem modeli sekcji zbudowanych Metodą Elementów Skończonych. Rozwiązanie jakiegokolwiek zagadnienia symulacji pracy sekcji obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu wymaga przyjęcia hipotetycznego przebiegu czasowego obciążenia zewnętrznego sekcji. W związku z tym analiza wyników symulacji obciążenia dynamicznego sekcji może dostarczyć niewielu informacji odnośnie do rzeczywistych przebiegów czasowych obciążenia dynamicznego działającego na sekcję rozpartą w wyrobisku.

2.2. Identyfikacja obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej na podstawie analizy uszkodzeń jej podzespołów

Warunkiem umożliwiającym oszacowanie parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, na podstawie uszkodzeń powstałych wskutek tąpnięcia, jest zarejestrowanie wystarczająco licznego zbioru szczegółowych informacji o uszkodzeniach – umożliwiającego opracowanie danych dotyczących odkształceń trwałych podzespołu sekcji obudowy zmechanizowanej oraz mechanizmu jego zniszczenia. Niestety, ani roczne raporty o stanie zagrożeń naturalnych [24, 25, 46, 47, 48, 49, 66], ani dokumentacja zgromadzona w działach tąpań w poszczególnych kopalniach nie zawierają tak szczegółowych informacji o uszkodzeniach podzespołów sekcji.

W tabeli 2.3 przedstawiono podział zarejestrowanych tąpnięć według miejsca ich występowania. Tąpnięcia w wyrobiskach ścianowych występują stosunkowo rzadko. Skutki tąpnięć w ścianach przejawiają się najczęściej w postaci zasypania przestrzeni roboczej spowodowanego odspojeniem węgla z czoła ściany i/lub zawału stropu bezpośredniego wyrobiska. Stosunkowo często odnotowywane jest również wypiętrzanie spągu oraz uszkodzenia sekcji obudowy zmechanizowanej czy ich podzespołów.

Przykład oszacowania obciążenia dynamicznego stojaków sekcji obudowy typu E3-4 (Alpine) z wykorzystaniem zarejestrowanych uszkodzeń przedstawił Budirsky w [15]. Przedmiotem badań były trwałe odkształcenia stojaków powstałe podczas tąpnięcia w kopalni „Doubrava" w Okręgu Ostrawsko – Karwińskim (Republika Czeska). W wyniku pomiarów średnicy cylindra 362 stojaków trwale odkształconych wskutek tąpnięcia, któremu towarzyszył wstrząs górotworu o energii rzędu 10^9 J, oszacowano maksymalne ciśnienie w przestrzeni podtłokowej stojaka (101 MPa) oraz energię przejętą przez stojak podczas tąpnięcia ($2{,}1 \cdot 10^5$ J) [14].

Znajomość obciążenia niszczącego podzespół sekcji obudowy zmechanizowanej umożliwia jedynie szacunkowy opis zewnętrznego obciążenia dynamicznego sekcji – i to nawet w tych przypadkach, opisanych np. w [14] czy [36], kiedy istnieje możliwość wykonania szczegółowych pomiarów stojaków trwale odkształconych wskutek tąpnięcia.

Tabela 2.3

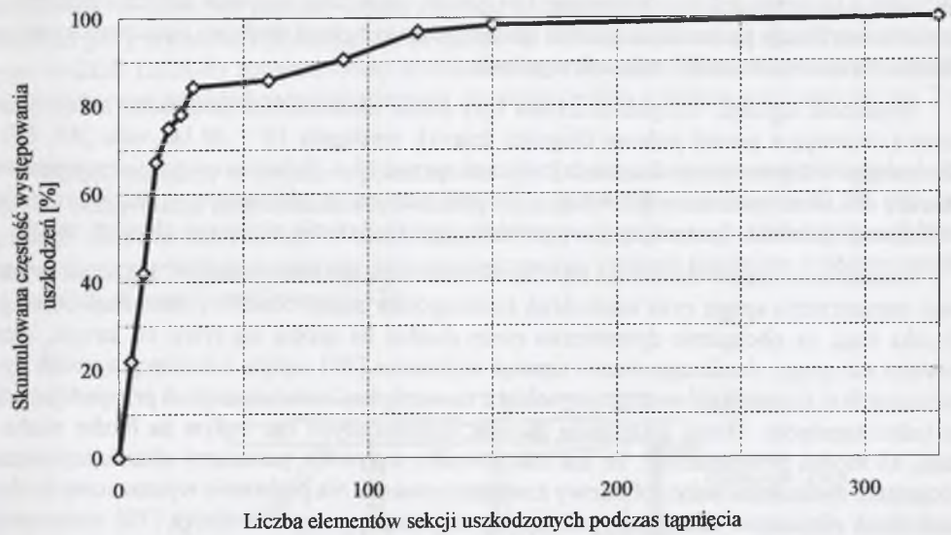
Zestawienie tąpnięć zarejestrowanych w kopalniach węgla kamiennego w latach 1985 ÷ 2002 według miejsca ich występowania

Rok	Liczba tąpnięć ogółem	w tym:				
		wyłącznie w chodnikach	w chodnikach i w ścianach		wyłącznie w ścianach	
			zawałowych	podsadzkowych	zawałowych	podsadzkowych
1985	15	9	1	1	-	2+2 [2]
1986	27	18	2	3	-	4
1987	13	9	2	2	-	-
1988	14	11	1	1	-	1 [2]
1989	15	9	1	1	3	1 [2]
1990	16	12	1	1	1 [1]	1
1991	8	7	-	1	-	-
1992	10	4	2	1	1	2
1993	18	10	3	2	1	2
1994	12	7	2	1	-	2
1995	7	6	-	1	-	-
1996	2	2	-	-	-	-
1997	2	1	-	1	-	-
1998	5	3	-	1	1	-
1999	2	–	1	–	1	–
2000	2	2	–	–	–	–
2001	4	3	1	–	–	–
2002	4	4	–	–	–	–
Razem	176	117	17	17	8	17

[1] Ściana w rozruchu.
[2] Ściana z obudową indywidualną.

Problematyce identyfikacji rodzajów uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej zabudowanych w ścianach, w których wystąpiły tąpnięcia, poświęcono również prace [58, 68, 69, 70]. Korzystając z danych zawartych w Głównym Rejestrze Tąpań, wyników ankiety przeprowadzonej w działach tąpań i działach energomaszynowych kopalń oraz specjalistycznego komputerowego systemu identyfikacji uszkodzeń usystematyzowano informacje o 64 przypadkach tąpnięć, podczas których wystąpiły uszkodzenia elementów sekcji. Spośród ponad 1700 uszkodzeń różnych podzespołów obudowy aż 82% przypada na części składowe podpornościowego układu hydraulicznego, a uszkodzenia stojaków hydraulicznych stanowią 54% wszystkich zarejestrowanych uszkodzeń. W związku z tym celowe jest podjęcie w niniejszej pracy problematyki identyfikacji parametrów charakteryzujących zmiany siły w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu.

W większości przypadków liczba uszkodzeń elementów sekcji powstałych wskutek pojedynczego tąpnięcia jest mała. Na rysunku 2.5 pokazano wykres skumulowanej częstości występowania liczby elementów sekcji obudowy zmechanizowanej uszkodzonych



Rys. 2.5. Wykres skumulowanej częstości występowania liczby uszkodzeń podzespołów sekcji obudowy zmechanizowanej podczas jednego tąpnięcia

Fig. 2.5. Diagram of accumulated failure rate of subassemblies of powered roof support during one bump

podczas jednego tąpnięcia. W przypadku 50% analizowanych tąpnięć liczba elementów sekcji uszkodzonych w wyniku jednego tąpnięcia jest mniejsza niż 11 elementów. Dla 75% analizowanych zdarzeń liczba elementów sekcji uszkodzonych w trakcie jednego tąpnięcia jest mniejsza od 20. Wyznaczenie obciążenia niszczącego element sekcji drogą pomiarów dołowych jest więc bardzo trudne.

Na przykład, prawdopodobieństwo wyznaczenia (podczas pomiarów dołowych) obciążenia niszczącego stojak wskutek tąpnięcia jest mniejsze niż 7%, przy założeniu że pomiary są wykonywane akurat w jednej z 48 ścian, w których podczas tąpnięcia uszkodzeniu uległo nie więcej niż 20 stojaków.

Informacje o miejscu występowania uszkodzeń podzespołów sekcji obudowy zebrane w [58, 68] wskazują ponadto na lokalny charakter skutków tąpnięcia w ścianie. W przypadku 50% omawianych zdarzeń długość odcinka ściany, na którym skoncentrowały się uszkodzenia obudowy, nie przekracza 18% całkowitej długości ściany, natomiast tylko w przypadku 7 tąpnięć (11% analizowanych zdarzeń) uszkodzenia obudowy objęły odcinek ściany stanowiący ponad 70% jej całkowitej długości. Lokalny charakter występowania skutków tąpnięcia w wyrobisku ścianowym poważnie utrudnia pomiar obciążenia niszczącego element sekcji. Wskazuje ponadto na konieczność szczególnie starannego wyboru miejsca wykonywania pomiarów.

Przytoczone szacunkowe obliczenia przedstawiono jedynie celem zilustrowania problemów, w dużym stopniu utrudniających pomiar obciążenia dynamicznego niszczącego podzespoły sekcji w wyrobisku eksploatacyjnym. Ponieważ prawdopodobieństwo zarejestrowania obciążenia dynamicznego niszczącego element sekcji jest niewielkie, to wyznaczenie tego obciążenia jest możliwe jedynie w wyniku badań stanowiskowych bądź symulacji komputerowej z wykorzystaniem modelu sekcji obudowy zmechanizowanej. Dlatego

też celem pomiarów dołowych powinno być przede wszystkim zebranie danych umożliwiających identyfikację parametrów modelu służącego do symulacji obciążeń niszczących sekcję obudowy zmechanizowanej wskutek tąpnięcia.

Większość tąpnięć, których skutkiem były liczne uszkodzenia elementów sekcji obudowy (obejmujące ponad połowę długości ściany), wystąpiła 10 – 20 lat temu [68, 69]. Korzystając z dokumentacji dotyczącej zdarzeń sprzed 10 – 20 lat nie można jednoznacznie określić ani stanu technicznego sekcji – stopnia zużycia jej elementów – ani też rodzaju i lokalizacji zjawiska dynamicznego wywołującego obciążenie niszczące element sekcji.

Stosunkowo często obserwuje się równoczesne występowanie skutków tąpnięcia w postaci wypiętrzenia spągu oraz uszkodzeń podzespołów sekcji obudowy zmechanizowanej. Wynika stąd, że obciążenie dynamiczne może działać na sekcję nie tylko od stropu, lecz również od spągu. Analizując skutki tąpnięć wykazano [69] wpływ lokalizacji zjawisk dynamicznych w stropie bądź w spągu wyrobiska na względną liczbę uszkodzeń przypadających na jedno tąpnięcie. Skoro lokalizacja zjawisk dynamicznych ma wpływ na liczbę uszkodzeń, to można przypuszczać, że ma ona również wpływ na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej. Na podstawie wyznaczonej liczby uszkodzeń elementów sekcji przypadających na jedno tąpnięcie Profaska [70] oszacował wartość współczynnika dynamicznego charakteryzującego obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowane spowodowane tąpnięciem określonego rodzaju. Wartości współczynników dynamicznych k_d oszacowane przez Profaskę [70] są zgodne z wartościami k_d podanymi przez Szuścika [92] (por. tabela 2.1).

Analiza danych dotyczących uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanych tąpnięciem umożliwiła sformułowanie następujących wniosków dotyczących tematyki podjętej w niniejszej pracy:

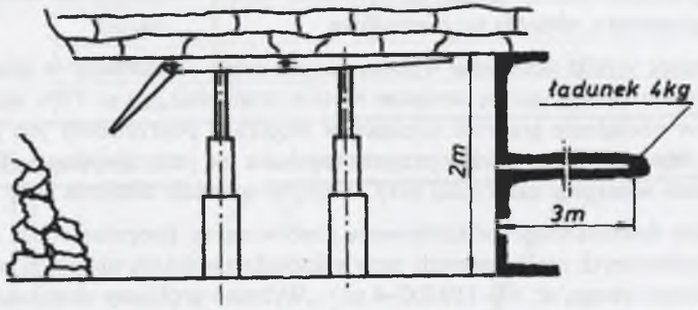
1. Ze względu na dużą częstotliwość występowania uszkodzeń stojaków hydraulicznych w ogólnej liczbie uszkodzeń elementów sekcji wskutek tąpnięcia należy wyznaczyć parametry charakteryzujące przebiegi czasowe siły w stojakach oraz związki pomiędzy nimi a rodzajem dynamicznego oddziaływania górotworu.
2. Z uwagi na znikomo małe prawdopodobieństwo wyznaczenia parametrów obciążenia dynamicznego sekcji niszczącego jej element, celem pomiarów dołowych powinno być przede wszystkim zebranie danych umożliwiających identyfikację parametrów modelu służącego do symulacji obciążeń niszczących sekcję obudowy zmechanizowanej wskutek tąpnięcia, a nie pomiar obciążenia niszczącego sekcję.

2.3. Badania dołowe obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Pomiary obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej wykonywane są bardzo rzadko. Jedną z istotnych przyczyn tego stanu rzeczy są problemy spowodowane zarówno trudnym do przewidzenia czasem i miejscem wystąpienia obciążenia dynamicznego, jak też koniecznością prowadzenia długotrwałych pomiarów w warunkach i środowisku niekorzystnie wpływającym na stan techniczny aparatury pomiarowej.

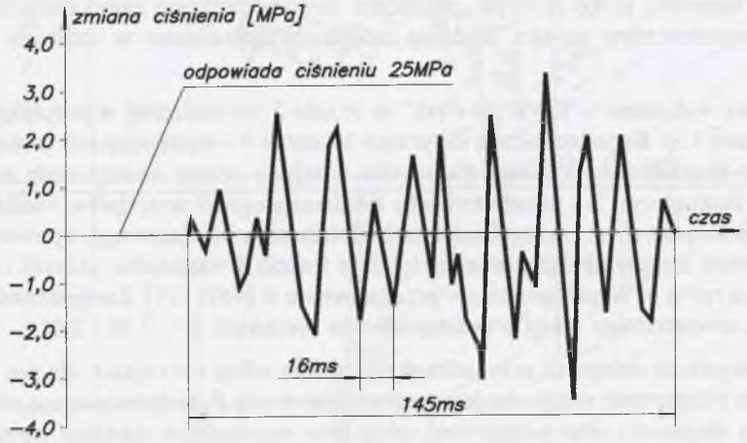
Większość opublikowanych przebiegów czasowych obciążenia dynamicznego, czy to stojaków hydraulicznych, czy też sekcji obudowy zmechanizowanej, dotyczy obciążeń sprowokowanych sztucznie poprzez odpalenie ładunku materiału wybuchowego [12, 60, 77]. Stoiński [77] wyznaczył przebieg zmian ciśnienia w stojakach sekcji obudowy ramowej typu FAZOS 12/28-Pz spowodowany strzelaniem wstrząsowym. Warunki przeprowadzania pomiarów oraz przykład zarejestrowanego przebiegu zmian ciśnienia pokazano na rys. 2.6 i 2.7.

Zmiany ciśnienia w stojakach pokazane na rys. 2.7 charakteryzuje częstotliwość około 60 Hz. Maksymalna amplituda zmian ciśnienia wynosi 3,4 MPa, co stanowi 13,3% początkowego ciśnienia statycznego w stojakach. Porównywalny przyrost obciążenia stojaków spowodowany strzelaniem wstrząsowym zarejestrowano podczas pomiarów wykonywanych w kopalni „Novaký" na Słowacji [42].



Rys. 2.6. Warunki przeprowadzania pomiarów zmian ciśnienia w stojakach spowodowanych strzelaniem wstrząsowym [72]

Fig. 2.6. Conditions of carrying out of measurements of the variation of pressure in legs caused by shock blasting [72]



Rys. 2.7. Zarejestrowany przebieg zmian ciśnienia w stojaku spowodowany strzelaniem wstrząsowym (początkowe ciśnienie statyczne – 25,5 MPa) [72]

Fig. 2.7. Recorded course of the variation of pressure in a leg caused by shock blasting (initial static pressure – 25.5 MPa) [72]

Informacje odnośnie do obciążenia, przenoszonego przez sekcję obudowy podczas samoistnych wstrząsów górotworu, zazwyczaj dotyczą pojedynczych pomiarów zarejestrowanych np. podczas badań, których celem były długotrwałe pomiary obciążeń statycznych obudowy zmechanizowanej [63, 71]. Celem pomiarów wykonanych przez Romanowicza [71, 72] była ocena możliwości prognozowania czasu wystąpienia wstrząsu górotworu na podstawie pomiarów ciśnienia statycznego w stojakach. Stwierdzono, że istnieje możliwość wyposażenia sekcji obudowy zmechanizowanej w układ pomiarowy sygnalizujący możliwość wystąpienia wstrząsu lub tąpnięcia na podstawie ciągłego pomiaru tempa przyrostu ciśnienia w stojakach [71]. Ponieważ celem tych pomiarów była analiza quasi-statycznych zmian ciśnienia w stojakach w dłuższych odcinkach czasu (do 1 godziny), stosowano okres próbkowania sygnału pomiarowego wynoszący 30 s. Dlatego też nawet po dotarciu do materiałów źródłowych [72] przeanalizowanie zarejestrowanych przebiegów sygnałów pomiarowych w krótszych odcinkach czasu, obejmujących chwilę wystąpienia wstrząsu górotworu, okazało się niemożliwe.

Analizując wyniki pomiarów wykonywanych przez 16 miesięcy w ścianie prowadzonej pod trudno rabującym się stropem Klishin stwierdził, że w 70% zarejestrowanych przypadków obciążenia przyrost ciśnienia w stojakach poprzedzony jest jego spadkiem, natomiast pierwszy obserwowany przyrost ciśnienia nie jest największy. Największa wartość ciśnienia występuje zazwyczaj przy kolejnym wzroście ciśnienia [39].

Pomiary dynamicznego oddziaływania górotworu na stropnicę sekcji były przedmiotem prac badawczych realizowanych, przy współudziale autora niniejszej pracy, w ramach problemu resortowego nr NB-119/RG-4 pt.: „Wybrane problemy eksploatacji złóż na dużych głębokościach" [94, 95, 96, 97].

Uproszczona metoda pomiaru, opracowana przez autora niniejszej pracy, polegała na wyznaczeniu obciążenia sekcji poprzez pomiar wypadkowej siły przenoszonej przez stojaki hydrauliczne. Z uwagi na przewidywany krótki czas trwania obciążenia dynamicznego sekcji zrezygnowano z pomiaru ciśnienia cieczy w przestrzeni podtłokowej stojaków. Siłę w stojaku mierzono prototypowym czujnikiem tensometrycznym zamocowanym na przedłużaczu mechanicznym stojaka. Budowę czujnika przedstawiono w rozdziale 5.2 niniejszej pracy.

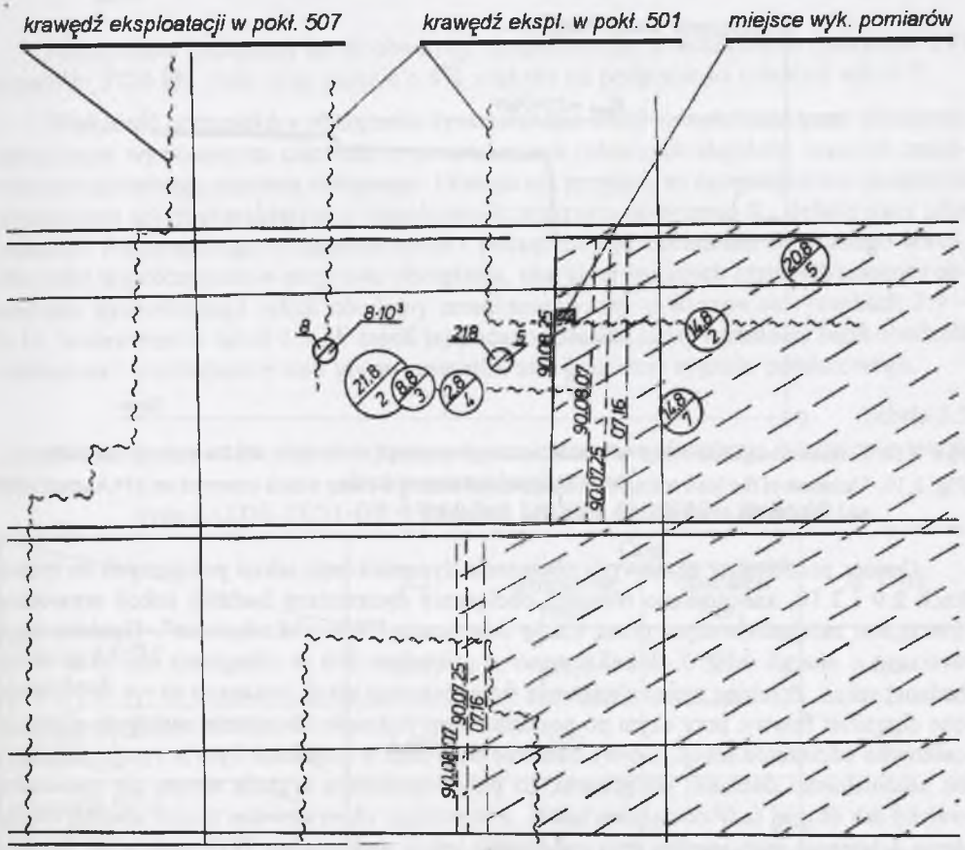
Pomiary wykonano w KWK „Bobrek" w ścianie 3 prowadzonej w przyspągowej warstwie pokładu 510. Dane techniczne dotyczące ściany nr 3 i występujących w niej zagrożeń zestawiono w tabeli 2.4. Wstrząsy górotworu w rejonie ściany występowały stosunkowo często, co ilustruje rys. 2.8 przedstawiający lokalizację ognisk wstrząsów. Niestety, awarie aparatury pomiarowej, w szczególności uszkodzenie toru pomiarowego, spowodowały, że zarejestrowano zmiany obciążenia sekcji tylko w trakcie 3 wstrząsów, których ogniska zaznaczono na rys. 2.8. Wyniki pomiarów przedstawiono w [96] i [97]. Zarejestrowane zmiany obciążenia zewnętrznego sekcji przedstawiono na rysunkach 2.9, 2.10 i 2.11.

We wszystkich opisanych przypadkach obciążenie sekcji było niskie. Na rys. 2.9 – 2.11 zaznaczono podporność sekcji obudowy zmechanizowanej P_r (odpowiadającą ciśnieniu roboczemu w stojakach) oraz podporność sekcji przy nominalnym ciśnieniu wstępnym P_{wst}. Z przebiegu wykresów zmiany obciążenia sekcji, pokazanych na rys. 2.9 – 2.11, wynika, że niemalże przez cały czas w stojakach utrzymuje się niskie ciśnienie, niższe nawet od nominalnego ciśnienia wstępnego. Świadczy to o małej wartości obciążenia wyrobiska w miejscu przeprowadzania pomiarów.

Tabela 2.4

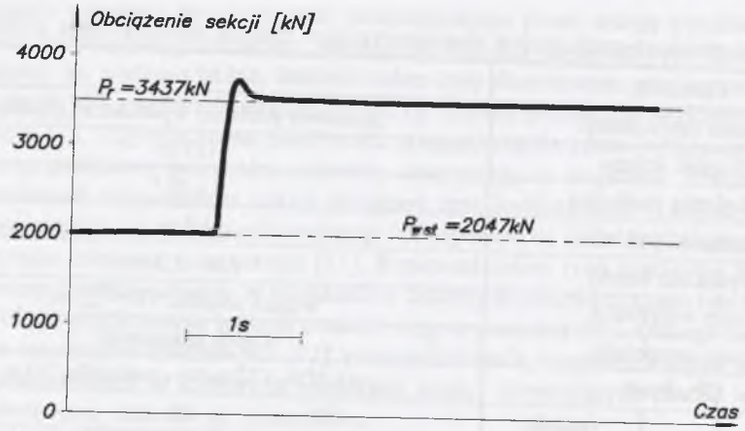
Warunki górniczo-geologiczne charakteryzujące miejsce wykonywania pomiarów

Parametr		
System eksploatacji		Ścianowy podłużny z podsadzką płynną
Długość ściany		127 m
Nachylenie podłużne		8 ÷ 10 °
Miąższość pokładu		4,8 m
Wysokość ściany		2,0 ÷ 2,3 m
Strop wyrobiska		Węgiel pokładu 510 – 2,5 m
Spąg wyrobiska		Łupek piaszczysty
Obudowa		FAZOS–17/31–Op z podziałką 2,0 m
Zagrożenie	tąpania	III
	wodne	II
	metan	I



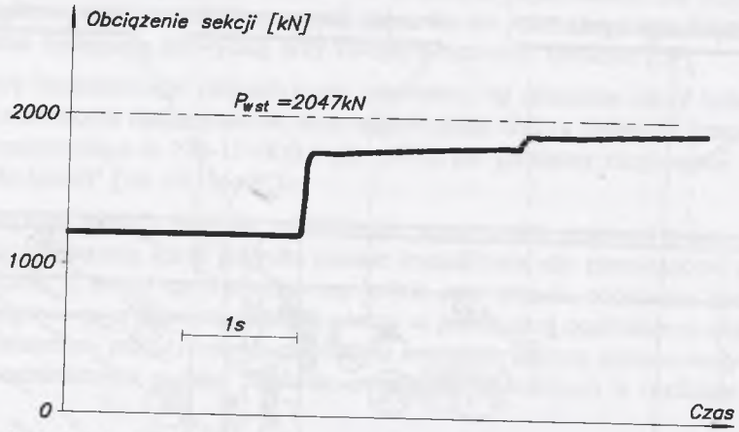
Rys. 2.8. Lokalizacja wstrząsów górotworu w rejonie ściany 3 pokładu 510 KWK "Bobrek"

Fig. 2.8. Location of bumps in the area of the longwall face no 3 in the 510 seam at the "Bobrek" Coal Mine



Rys. 2.9. Zmiany obciążenia sekcji w trakcie wstrząsu o energii $5 \cdot 10^4$ J, z dnia 20.08.1990

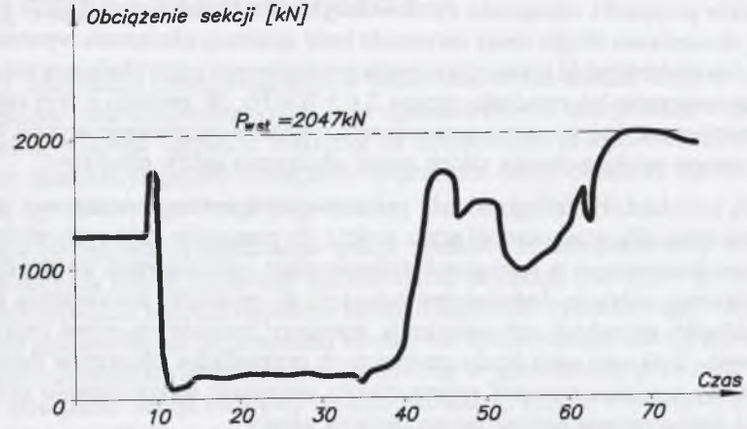
Fig. 2.9. Variation of the load acting on a support unit during a bump which occurred on 20th August 1990 and the energy of which was of $5 \cdot 10^4$ J



Rys. 2.10. Zmiana obciążenia sekcji w trakcie wstrząsu o energii $5 \cdot 10^3$ J i $2 \cdot 10^5$ J z dnia 21.08.1990

Fig. 2.10. Variation of the load acting on a support unit during a bump which occurred on 21st August 1990 and the energy of which was of $5 \cdot 10^3$ J and $2 \cdot 10^5$ J

Oprócz przebiegów czasowych obciążenia dynamicznego sekcji pokazanych na rysunkach 2.9 i 2.10, zanotowano również obciążenie dynamiczne badanej sekcji wywołane wstrząsem zarejestrowanym przez stację sejsmiczną KWK „Miechowice". Ognisko tego wstrząsu o energii $4 \cdot 10^4$ J zlokalizowano w pokładzie 509 w odległości ok. 9300 m od badanej sekcji. Przebieg zmian obciążenia dynamicznego sekcji pokazano na rys. 2.11. Mają one charakter falowy, przy czym po początkowym wzroście obciążenia następuje niemalże całkowite odciążenie sekcji. Gdyby ciśnienie statyczne w stojakach było przynajmniej równe nominalnemu ciśnieniu wstępnemu, to prawdopodobnie drgania stropu nie spowodowałyby tak długiej fazy odciążenia sekcji. Porównując obserwowane tempo spadku obciążenia z tempem jego spadku przy rabowaniu sekcji wykluczono [91] możliwość spowodowania przebiegu obciążenia przedstawionego na rys. 2.11 poprzez sterowanie układem podpornościowym sekcji.



Rys. 2.11. Zmiana obciążenia sekcji w trakcie wstrząsu zlokalizowanego w KWK „Miechowice"

Fig. 2.11. Variation of the load acting on a support unit during a bump located at the „Miechowice" Coal Mine

Maksymalne obciążenie sekcji obudowy zarejestrowane podczas badań (patrz rys. 2.9) wynosiło 3720 kN. Było więc jedynie o 8% większe od podporności roboczej sekcji P_r.

Większość przypadków obciążenia dynamicznego sekcji odnotowano przy obciążeniu statycznym wywołującym ciśnienie w przestrzeniach roboczych stojaków znacznie mniejsze od nominalnego ciśnienia wstępnego. Dlatego też przyjęto, że zarejestrowane obciążenie dynamiczne sekcji charakteryzuje współczynnik przyrostu obciążenia K_d, definiowany jako stosunek maksymalnego obciążenia sekcji i początkowego obciążenia statycznego sekcji. Wartości współczynników przyrostu obciążenia, charakteryzujących przebiegi czasowe obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, pokazane na rysunkach 2.9 – 2.11, zestawiono w tabeli 2.5. W tabeli tej podano również czasy narastania bądź opadania obciążenia i wynikające z nich górne częstotliwości graniczne sygnału pomiarowego.

Tabela 2.5

Zestawienie parametrów charakteryzujących zarejestrowane obciążenia dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS-17/31-OP w ścianie 3 pokładu 510 KWK „Bobrek"

	K_d	Czas		f_N [Hz]
		narastania [ms]	opadania [ms]	
wstrząs $5 \cdot 10^4$ J w zrobach	1,817	166,7	200	2,6
wstrząs $5 \cdot 10^3$ J na wybiegu	1,469	100	–	4,4
wstrząs $2 \cdot 10^5$ J na wybiegu	1,05	116,7	50	8,8
wstrząs w KWK „Miechowice"	1,458	500	1630	0,8

Wszystkie przypadki obciążenia dynamicznego zarejestrowane w trakcie badań charakteryzują stosunkowo długie czasy narastania bądź opadania obciążenia wynoszące 100 ÷ 200 ms. Górna częstotliwość graniczna sygnału pomiarowego odpowiadająca zarejestrowanym czasom narastania lub opadania wynosi 2,6 ÷ 8,8 Hz. W związku z tym zastosowana aparatura pomiarowa, której pasmo przenoszenia sygnału pomiarowego wynosi 0 ÷ 1 kHz, umożliwia wierne zarejestrowanie takich zmian obciążenia sekcji obudowy.

Badania potwierdziły funkcjonalność zastosowanej aparatury pomiarowej, a w szczególności czujników siły przenoszonej przez stojaki, do pomiarów dołowych obciążeń sekcji obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Umożliwiły one również zebranie doświadczeń odnośnie do metodyki prowadzenia pomiarów, a w szczególności sposobów zabezpieczenia aparatury pomiarowej przed uszkodzeniami mechanicznymi. Znikomo mała liczba zmierzonych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej uniemożliwiła natomiast wykorzystanie otrzymanych wyników do formułowania wniosków ogólniejszej natury.

Wykonanie pomiarów o szerszym niż dotąd zakresie stwarza możliwość uściślenia wartości parametrów obciążenia dynamicznego sekcji oraz określenia związków pomiędzy obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej a wielkościami fizycznymi charakteryzującymi zjawiska dynamiczne w górotworze. Wyniki pomiarów wielkości fizycznych zależnych od obciążenia dynamicznego sekcji umożliwią również identyfikację parametrów modeli fizycznych sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. W świetle wyżej wymienionych argumentów celowość podjęcia problematyki wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej poprzez wykonanie odpowiednich pomiarów w wyrobisku ścianowym jest uzasadniona.

3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań dołowych, analiza hipotez opisujących geomechaniczne uwarunkowania wystąpienia tąpnięcia czy też interpretacja uszkodzeń elementów sekcji wskutek tąpnięcia wskazują na konieczność przeprowadzania pomiarów parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku zagrożonym tąpaniami.

Pomiary obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej wykonywane dotychczas dotyczą niemal wyłącznie oddziaływania na sekcję wstrząsów górotworu prowokowanych sztucznie poprzez odpalenie ładunku materiału wybuchowego. Konieczne jest rozszerzenie zakresu badań na przypadki obciążenia dynamicznego sekcji, spowodowanego zjawiskami dynamicznymi powstałymi samoistnie w górotworze, gdyż nieliczne wyniki pomiarów obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej, którym towarzyszyły samoistne wstrząsy górotworu [98], nie upoważniają do formułowania wniosków ogólniejszej natury. Realizacja tego zadania wymagała przeprowadzenia długotrwałych pomiarów w wyrobiskach eksploatacyjnych zagrożonych tąpaniami. Wyniki tych pomiarów powinny między innymi umożliwić określenie wpływu rodzaju zjawisk dynamicznych występujących w górotworze, a szczególnie ich lokalizacji, na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji. Zagadnienie to jest, jak dotąd, słabo rozeznane zwłaszcza w odniesieniu do przypadków obciążenia dynamicznego sekcji, spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu na spągnice sekcji.

W niniejszej pracy nie rozpatrywano natomiast przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od czoła ściany, gdyż oszacowanie parametrów takiego obciążenia dynamicznego sekcji jest możliwe jedynie drogą badań modelowych [130].

Ze wstępnych pomiarów sił działających na sekcję obudowy zmechanizowanej rozpartą w wyrobisku [95, 98] wynika, że intensywność zmian siły w stojakach jest różnorodna – poczynając od quasi-statycznego przyrostu siły w stojaku wywołanego powolnym zaciskaniem wyrobiska, poprzez zmiany spowodowane rozpieraniem lub rabowaniem stojaka, aż po szybkie zmiany obciążenia występujące między innymi podczas wstrząsów górotworu, strzelań lub innych zjawisk dynamicznych zachodzących w górotworze. Miarą intensywności obciążenia sekcji jest średnie tempo przyrostu siły w stojakach – $w_{F,n}$ wyznaczane z zależności:

$$w_{F,n} = \frac{0{,}8\left(F_m - F_{st,p}\right)}{t_n} \tag{3.1}$$

gdzie:

F_m – maksymalna wartość siły w stojakach w trakcie rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji,

$F_{st,p}$ – początkowa statyczna siła w stojakach,

t_n – czas narastania obciążenia, wyznaczony zgodnie z PN-88/M-42000 [134].

W niniejszej pracy przyjęto, że dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej charakteryzuje średnie tempo zmiany siły w stojakach, co najmniej 1,25-krotnie większe od maksymalnej wartości średniego tempa zmiany siły w stojakach, spowodowanej rozpieraniem sekcji.

Zgodnie z [141] tąpnięciu towarzyszy fala uderzeniowa. Analiza obciążeń szybkozmiennych w czasie, spowodowanych falą uderzeniową, wymaga uwzględnienia w modelu matematycznym szeregu zjawisk fizycznych charakteryzujących stany nieustalone pól przemieszczeń obciążanych elementów sekcji [26, 32, 62]. Według [32, 62] dokładność pomiaru krótkotrwałych impulsów obciążenia może wynosić 2 ÷ 40% rzeczywistej wartości amplitudy obciążenia, przy czym nie wiadomo, czy tak duży błąd pomiarowy jest wynikiem niedokładności teorii opisujących zachodzące zjawiska, czy też błędnych zasad pomiaru odpowiednich wielkości charakteryzujących impulsy obciążenia. Z analizy zjawisk towarzyszących szybkozmiennemu obciążeniu rdzennika stojaka hydraulicznego, szczegółowo przedstawionych w [93], wynika, że w przypadku gdy czas narastania obciążenia jest krótszy od 0,01 s, konieczne jest uwzględnienie stanów nieustalonych w równaniach opisujących związek pomiędzy obciążeniem zewnętrznym a odkształceniem rdzennika. W przypadku czasów narastania obciążenia dłuższych od 10 ms błąd spowodowany pominięciem stanów nieustalonych rdzennika jest mniejszy od 2% [93].

Wartość czasu narastania obciążenia zewnętrznego - t_n wpływa na wartość górnej częstotliwości granicznej sygnału pomiarowego - f_N [32]:

$$f_N = \frac{0{,}44}{t_n} \tag{3.2}$$

Dla $t_n = 0{,}01$ s otrzymano:

$$f_N = 44 \text{ Hz}$$

Górna częstotliwość graniczna sygnału pomiarowego o czasie narastania $t_n = 0{,}01$ s jest większa od częstotliwości drgań konturu wyrobiska korytarzowego spowodowanych wstrząsem górotworu, wynoszącej 4 ÷ 10 Hz [50, 55]. Oznacza to, że czasy narastania obciążenia sekcji spowodowanego drganiami konturu wyrobiska są dłuższe od 10 ms. Uzasadnione jest więc ograniczenie przedmiotu niniejszej pracy do przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej powodującego zmiany siły w stojakach o czasie narastania dłuższym od 10 ms.

W związku z powyższym **przedmiotem niniejszej pracy jest identyfikacja parametrów charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu na stropnicę lub spągnice sekcji obudowy zmechanizowanej, powodujące zmiany siły w stojakach o czasie narastania dłuższym niż 0,01 s oraz o średnim tempie jej przyrostu przynajmniej o 25% większym od maksymalnej wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach, spowodowanego rozpieraniem sekcji.**

Biorąc pod uwagę wnioski wynikające z analizy stanu badań nad obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej, sformułowano następujące cele niniejszej pracy:
- wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji,
- określenie wpływu lokalizacji zjawisk dynamicznych w stropie bądź w spągu wyrobiska na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji,
- wyznaczenie parametrów charakteryzujących przebieg czasowy siły w stojakach spowodowany dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję,
- analiza związków pomiędzy czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji a parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej oraz przebieg czasowy siły w stojakach.

W niniejszej pracy rozpatrzono następujące czynniki determinujące obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji:
- warunki statycznej współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem, a szczególnie wartość statycznej siły w stojakach,
- rodzaj dynamicznego oddziaływania górotworu, a w szczególności:
  - zwrot obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,
  - rodzaj strzelania wykonywanego w wyrobisku,
  - energię wstrząsu towarzyszącego zarejestrowanym zmianom siły w stojakach oraz lokalizację ogniska tego wstrząsu,
  - gęstość energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiarów.

Szeroko rozumiana teza pracy została sformułowana następująco:

Pomiar przebiegów czasowych siły przenoszonej przez stojaki oraz przyspieszenia stropnicy umożliwia wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej.

Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej traktowane jest jako siła skupiona o charakterze losowym. Jednym z celów niniejszej pracy jest wyznaczenie wartości następujących parametrów tego obciążenia:
- gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji,
- wariancji obciążenia dynamicznego sekcji.

Udowodnienie wyżej sformułowanej tezy oraz osiągnięcie postawionych celów pracy wymaga:
- opracowania matematycznego modelu sekcji obudowy zmechanizowanej,
- opracowania metody identyfikacji parametrów modelu matematycznego sekcji na podstawie pomiarów wykonanych w wyrobisku,
- opracowania sposobu identyfikacji zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji,
- opracowania metody pomiaru wielkości charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji – wypadkowej siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy,
- wykonania pomiarów dołowych i opracowania ich wyników,
- identyfikacji parametrów modelu matematycznego sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu.

Ze względu na obserwowane różnice dotyczące liczby uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu na obudowę od stropu i od spągu [70] oraz odmienny charakter zjawisk dynamicznych zlokalizowanych w stropie i w spągu wyrobiska [85, 87], w niniejszej pracy wyróżniono dwa rodzaje obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej:
- obciążenie dynamiczne działające na sekcję od stropu,
- obciążenie dynamiczne działające na sekcję od spągu.

W związku z powyższym konieczne było opracowanie sposobu identyfikacji zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem pomiaru przebiegu czasowego siły w stojakach oraz przyspieszenia stropnicy.

Wielkościami niezbędnymi do obliczenia wartości parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej są:
- gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach, wyznaczona na postawie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w wyrobisku,
- transmitancja widmowa modelu sekcji obudowy zmechanizowanej.

W niniejszej pracy rozpatrywano dwa modele fizyczne sekcji obudowy zmechanizowanej:
- model sekcji poddanej dynamicznemu obciążeniu od stropu
- model sekcji poddanej dynamicznemu obciążeniu od spągu.

Wartości parametrów tych modeli uzależnione są od:
- zredukowanej masy sekcji obudowy zmechanizowanej,
- sprężystości stojaków,
- masy bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu,
- częstości własnych oraz współczynników tłumienia sekcji.

Wartości wyżej wymienionych wielkości są zależne od wyników pomiarów wykonanych w wyrobisku. I tak:
- wysokość sekcji wpływa na wartość zredukowanej masy sekcji i współczynnika sprężystości stojaka,
- wartość masy bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu oszacowano korzystając z przebiegu czasowego siły w stojakach,
- częstości własne oraz współczynniki tłumienia sekcji obudowy zmechanizowanej wyznaczono korzystając z modeli parametrycznych sygnału przyspieszenia stropnicy.

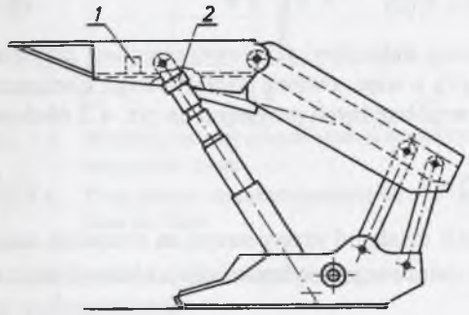
Odrębnym zagadnieniem jest wyznaczenie parametrów charakteryzujących przebieg czasowy siły w stojakach spowodowany dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję oraz określenie związków pomiędzy tymi parametrami a czynnikami determinującymi statyczne i dynamiczne obciążenie sekcji.

4. METODA IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ

Przy opracowaniu metody identyfikacji parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji przyjęto następujące założenia upraszczające:
- obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej redukuje się do siły skupionej przyłożonej do stropnicy lub spągnicy, normalnej do płaszczyzny styku tych elementów z górotworem,
- w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu chwilowy ruch stropnicy jest ruchem postępowym.

Parametry obciążenia dynamicznego sekcji zidentyfikowano korzystając z wyników pomiarów odpowiednich sygnałów, wykonanych w wyrobisku ścianowym. Przedmiotem tych pomiarów była równoczesna rejestracja przebiegów czasowych dwóch wielkości fizycznych:
- wypadkowej siły przenoszonej przez stojaki,
- przyspieszenia stropnicy.

Rozmieszczenie czujników w sekcji przedstawiono schematycznie na rys. 4.1. Szczegółowe informacje dotyczące układu pomiarowego zastosowanego podczas pomiarów wykonywanych w wyrobiskach ścianowych podano w rozdziale 5.1 pracy.



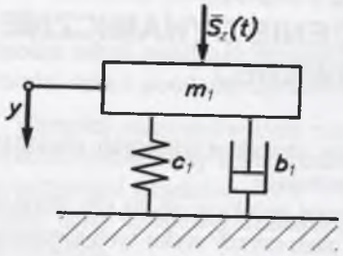
Rys. 4.1. Schemat rozmieszczenia czujników w sekcji: 1 – czujnik przyspieszenia, 2 – czujnik siły

Fig. 4.1. Diagram of the arrangement of sensing elements on a support unit: 1 – acceleration sensor, 2 – force sensor

Celem wyznaczenia cech obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, takich jak: zwrot wektora tego obciążenia, gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, czy jego wariancja, należy rozpatrzyć modele sekcji obudowy zmechanizowanej przedstawione poniżej.

4.1. Wyznaczenie zwrotu początkowego obciążenia dynamicznego sekcji

Określenie zwrotu początkowego obciążenia dynamicznego sekcji jest równoznaczne z ustaleniem, czy zjawisko dynamiczne wywołujące je zlokalizowane jest w stropie czy w spągu wyrobiska. Celem wyznaczenia zwrotu początkowego obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej rozpatrzono model sekcji przedstawiony na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Uproszczony model sekcji obudowy zmechanizowanej

Fig. 4.2. Simplified model of a powered roof support unit

Równanie różniczkowe ruchu sekcji (traktowanej jako mechanizm o jednym stopniu swobody) wokół położenia równowagi wymuszonego przez statyczne oddziaływanie górotworu, przyjmuje postać:

$$m_1 \ddot{y} + b_1 \dot{y} + c_1 y = S_z(t) \tag{4.1}$$

gdzie:

m_1 – masa sekcji zredukowana do środka masy stropnicy,

b_1 – współczynnik tłumienia wiskotycznego,

c_1 – współczynnik sprężystości sekcji,

$S_z(t)$ – siła zewnętrzna działająca na sekcję, zmienna w czasie.

Początkowe obciążenie dynamiczne sekcji jest równe początkowej sile zewnętrznej $S_z(t = 0)$. Z warunków początkowych, odpowiadających położeniu równowagi sekcji obciążonej siłą P_{st}, przyjmujących postać równań (4.2) i (4.3):

$$y_1(0) = 0 \tag{4.2}$$

$$\dot{y}_1(0) = 0 \tag{4.3}$$

wynika zależność:

$$m_1 \ddot{y}_1(0) = S_z(0) \tag{4.4}$$

Oznacza to, że w chwili początkowej zwroty wektorów: składowej pionowej przyspieszenia stropnicy i obciążenia zewnętrznego $S_z(0)$, a więc również początkowego obciążenia dynamicznego sekcji, są zgodne. W układzie współrzędnych przyjętym na rys. 4.2 obciążenie zewnętrzne

$$S_z(0) > 0 \tag{4.5}$$

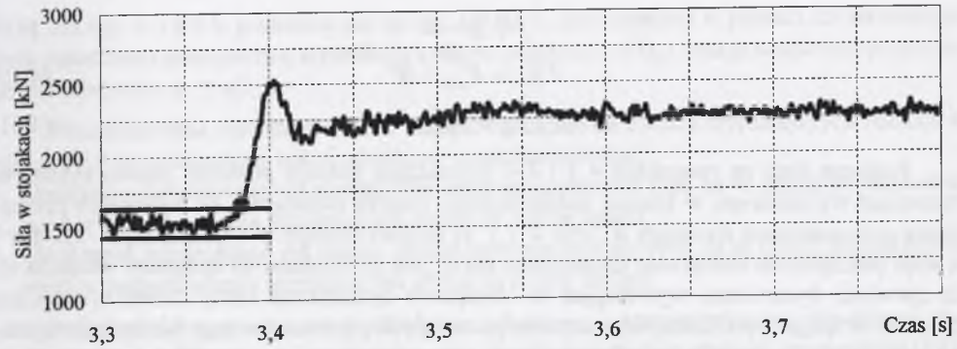
odpowiadające dodatniemu przyspieszeniu $\ddot{y}(0)$ działa od strony stropu na stropnicę, natomiast, ze względu na jednostronny charakter więzów pomiędzy sekcją a skałami otaczającymi, siłę:

$$S_z(0) < 0 \tag{4.6}$$

należy interpretować jako obciążenie zewnętrzne przyłożone od strony spągu do spągnicy.

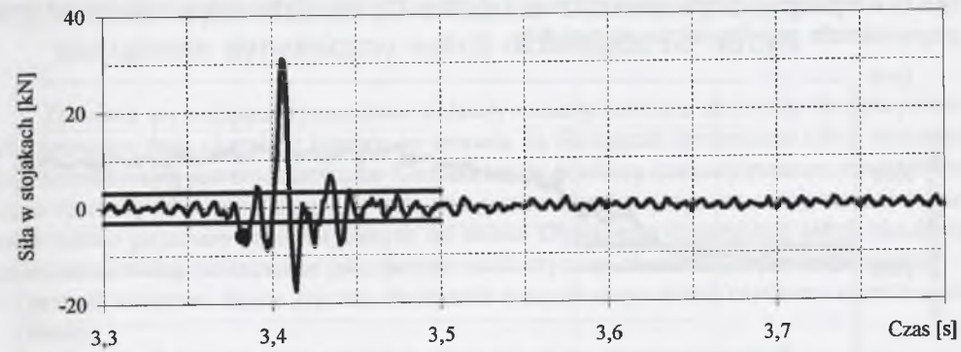
W trakcie pomiarów, oprócz przyspieszenia stropnicy, wyznacza się również siłę w stojakach. Jej wartość, niezależnie od zwrotu zewnętrznego obciążenia sekcji, zawsze rośnie. W związku z tym określenie zwrotu siły początkowego obciążenia dynamicznego sekcji polega na wyznaczeniu zwrotu przyspieszenia stropnicy w chwili, gdy wartość wypadkowej siły w stojakach zaczyna rosnąć.

Przykładowe przebiegi czasowe siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy przedstawiono na rysunkach 4.3 i 4.4. Zarejestrowano je podczas pomiarów wykonywanych w ścianie IV prowadzonej w pokładzie 501 w KWK „Wujek".



Rys. 4.3. Przebieg czasowy siły w stojakach spowodowany obciążeniem dynamicznym sekcji działającym od spągu

Fig. 4.3. Time related course of force in legs caused by dynamic load acting on a support unit from the floor



Rys. 4.4. Przebieg czasowy przyspieszenia stropnicy spowodowany obciążeniem dynamicznym sekcji działającym od spągu

Fig. 4.4. Time related course of acceleration of a canopy caused by dynamic load acting on a support unit from the floor

Założono dopuszczalne poziomy szumu sygnału pomiarowego określone następującymi zależnościami:

– dla sygnału wypadkowej siły w stojakach:

$$\delta F = 0{,}1(F_m - F_{st,p}) \tag{4.7}$$

– dla sygnału przyspieszenia stropnicy:

$$\delta a = 0{,}1|a_{max}| \tag{4.8}$$

gdzie:

F_m – maksymalna wartość siły w stojakach w trakcie rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji,

$F_{st,p}$ – początkowa statyczna siła w stojakach,

a_{max} – maksymalna wartość przyspieszenia stropnicy podczas rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji.

Przyjęto, że początkowe przyspieszenie stropnicy a_o wystąpi w chwili czasu t_o, w której spełniane są warunki:

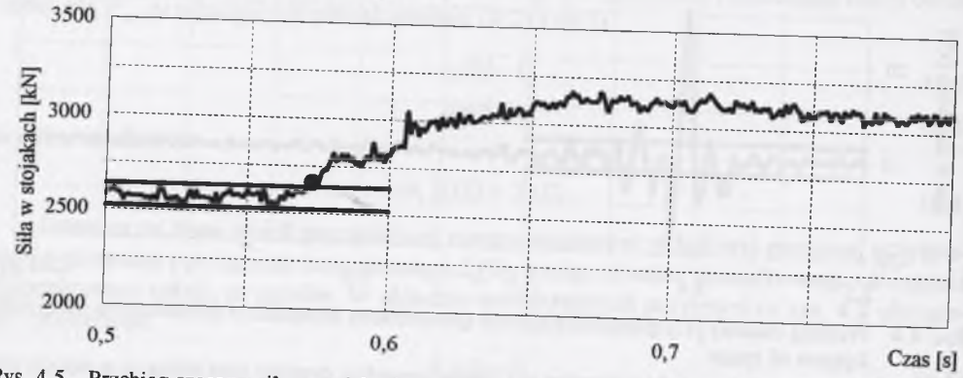
$$|a(t_o)| > \delta a \tag{4.9}$$

$$F(t_o) > F_{st,p} + \delta F \tag{4.10}$$

$$a_o = a(t_o) \tag{4.11}$$

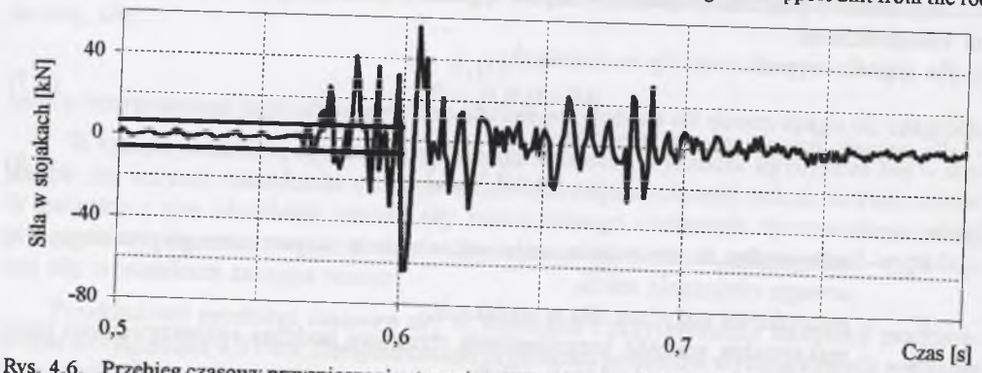
Poziome linie na rysunkach 4.3 i 4.4 wyznaczają granice poziomu szumu sygnałów, natomiast wyróżnikiem w postaci zaczernionego punktu oznaczono na wykresach początkowe przyspieszenie stropnicy a_o oraz $F(t_o)$. W rozpatrywanym przypadku a_o = -5,9 m·s^{-2}, a więc początkowe obciążenie dynamiczne sekcji jest przyłożone do spągnicy. Oznacza to, że zjawisko dynamiczne wywołujące to obciążenie dynamiczne sekcji zlokalizowane jest również w spągu wyrobiska. Wyznaczenie pozostałych parametrów tego obciążenia wymaga uwzględnienia w obliczeniach masy bryły górotworu naruszonego działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Zagadnienie to przedstawiono w rozdziale 4.3 niniejszej pracy.

Przykład obciążenia stojaków spowodowanego obciążeniem dynamicznym działającym na stropnicę sekcji pokazano na rys. 4.5. Zarejestrowany równocześnie przebieg czasowy przyspieszenia przedstawiono na rys. 4.6.



Rys. 4.5. Przebieg czasowy siły w stojakach spowodowany obciążeniem dynamicznym sekcji działającym od stropu

Fig. 4.5. Time related course of force in legs caused by dynamic load acting on a support unit from the roof



Rys. 4.6. Przebieg czasowy przyspieszenia stropnicy spowodowany obciążeniem dynamicznym sekcji działającym od stropu

Fig. 4.6. Time related course of acceleration of a canopy caused by dynamic load acting on a support unit from the roof

Na rys. 4.5 i 4.6, podobnie jak na rys. 4.3 i 4.4, wyróżnikiem w postaci zaczernionego koła oznaczono początkową wypadkową siłę w stojakach – $F(t_o)$ oraz początkowe przyspieszenie stropnicy $a_o = a(t_o)$.

Przedstawiona metoda pomiaru umożliwia ustalenie dwóch wyróżnionych rodzajów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej:

- obciążenia działającego od stropu, charakteryzującego się tym, że w chwili początkowej wektor przyspieszenia stropnicy ma zwrot w stronę spągu,
- obciążenia działającego od spągu, charakteryzującego się tym, że w chwili początkowej wektor przyspieszenia stropnicy ma zwrot w stronę stropu.

Obciążenie dynamiczne sekcji działające od stropu jest spowodowane zjawiskami dynamicznymi zlokalizowanymi w stropie – np.: nieeksplozyjnymi tąpaniami stropowymi [89]. Według Szuścika przyczyną obciążenia dynamicznego sekcji działającego od spągu są eksplozyjne tąpania spągowe lub spodkowe [87].

4.2. Metoda wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji działające od stropu

Zjawiska wywołujące dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej mają charakter losowy, co sprawia, że obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej jest stochastyczne. Chociaż każdy przebieg czasowy procesu stochastycznego różni się od poprzedniego, to mają one pewne charakterystyczne cechy umożliwiające odróżnianie procesów stochastycznych od siebie. Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, traktowane jako proces stochastyczny, charakteryzują wystarczająco:

- gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,
- wariancja obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

Funkcję gęstości widmowej mocy sygnału[1] obciążenia dynamicznego sekcji określa wzór [123]:

$$S_{P_z}(\omega) = \lim_{T_o \to \infty} \frac{|\mathcal{P}_z(j\omega)|^2}{2\,T_o} \tag{4.12}$$

gdzie:

$\mathcal{P}_z(j\omega)$ – transformata Fouriera obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej $P_z(t)$,

$$\mathcal{P}_z(j\omega) = \int_0^{T_o} P_z(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \tag{4.13}$$

T_o – długość przedziału czasowego obciążenia dynamicznego sekcji.

Stosując szeregi Fouriera można funkcję – $P_z(t)$ obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej przedstawić w postaci sumy harmonicznych. Ponieważ funkcja $P_z(t)$ nie jest funkcją okresową, to przedstawiający ją szereg Fouriera przyjmuje postać funkcji ciągłej zwanej funkcją gęstości widmowej. Za miarę udziału poszczególnych harmonicz-

[1] Nazwa przyjęta w teorii sygnałów.

nych w całym widmie przyjmuje się kwadrat amplitudy – wartości średniej gęstości widmowej w danym wąskim przedziale częstości. Ponieważ moc przenoszona przez sygnał jest również proporcjonalna do kwadratu jego amplitudy, to funkcja określająca wartość kwadratu gęstości widmowej nazywana jest funkcją gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Jedną z najbardziej efektywnych metod wyznaczania gęstości widmowej mocy analizowanego przebiegu czasowego jest metoda periodogramu, oparta na algorytmie FFT [121].

Wariancję obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej określa wzór [13]:

$$\delta_z^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty S_{Pz}(\omega)\, d\omega \tag{4.14}$$

gdzie:

S_{Pz} – gęstość widmowa mocy obciążenia dynamicznego sekcji.

Wyżej wymienione parametry wyznaczono przyjmując założenie o ergodyczności procesu stochastycznego obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Oznacza to, że istnieje możliwość oszacowania wartości parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej ($S_{Pz}(\omega)$ i δ_z^2) na podstawie obserwacji jednego przebiegu w dostatecznie długim czasie.

Parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej wyznaczone zostały na podstawie wyników pomiarów wykonanych w wyrobisku. Podczas tych pomiarów rejestrowano przebiegi czasowe siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy, a więc wielkości charakteryzujące odpowiedź układu na wymuszenie zewnętrzne w postaci obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. W związku z powyższym wykorzystanie tych sygnałów pomiarowych do wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej wymagało opracowania modelu matematycznego sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. Analiza tego modelu pozwala na określenie związku pomiędzy wielkościami fizycznymi mierzonymi w wyrobisku a gęstością widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu lub spągu.

4.2.1. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu na stropnicę sekcji

Przedmiotem rozważań jest model fizyczny o dwóch stopniach swobody przedstawiony na rys. 4.7. O wyborze takiego modelu sekcji obudowy zmechanizowanej zadecydowano korzystając z wyników analizy modeli funkcjonalnych układu górotwór – sekcja obudowy zmechanizowanej, omówionych szczegółowo w pracy [111]. Stwierdzono bowiem, że zastosowanie modelu o liczbie stopni swobody większej od 2 nie powoduje istotnego zmniejszenia błędu zgodności symulacji komputerowej przebiegu czasowego siły w stojakach z przebiegiem czasowym tej siły zarejestrowanym w wyrobisku [111].

Parametrami modelu przedstawionego na rys. 4.7, zależnymi od właściwości sekcji obudowy zmechanizowanej, są:

- masa skupiona m_1 – równa masie sekcji obudowy zmechanizowanej zredukowanej do środka masy stropnicy,

- element sprężysty o współczynniku sprężystości c_1,
- element tłumiący o współczynniku tłumienia b_1.

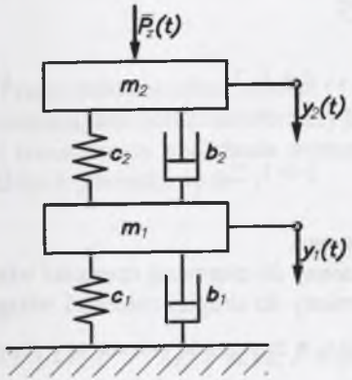
Właściwości bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu określają:

- masa skupiona m_2 [1],
- element sprężysty o współczynniku sprężystości c_2,
- element tłumiący o współczynniku tłumienia b_2.

Współczynniki sprężystości c_2 i tłumienia b_2 modelują więzy nałożone na ruch bryły o masie m_2 przez górotwór naruszony.

Na rozpatrywany model działa siła $P_z(t)$ – obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej. Przemieszczenia mas m_1 i m_2 względem położenia równowagi, wymuszonego przez obciążenie statyczne sekcji, określają współrzędne $y_1(t)$ i $y_2(t)$.

Wyznaczając współczynnik sprężystości sekcji założono, że odkształcenie stropnicy, osłony, łączników i spągnic jest pomijalnie małe w porównaniu ze zmianami długości stojaków. Zmiany długości stojaka zależą od wielkości przenoszonego obciążenia, wysokości słupa cieczy pod tłokiem oraz sztywności cylindra i rdzennika. W pracy [109] wykazano, że w przedziale zmian obciążenia stojaka, wynikających z nastawienia zaworu roboczego, związek pomiędzy siłą w stojaku a zmianą jego długości aproksymuje zależność liniowa. Po uwzględnieniu związków wynikających z uproszczonego schematu sekcji, przedstawionego na rysunku 4.8, zależność pomiędzy współczynnikiem sprężystości sekcji a siłą w stojakach przyjmuje postać równania (4.15):



Rys. 4.7. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony stropu

Fig. 4.7. Physical model of a powered roof support unit exposed to dynamic action of the rock body coming from the roof

$$c_1 = \frac{S}{y_1} = \frac{F \sin\alpha}{\frac{\Delta l}{\sin\alpha}} \tag{4.15}$$

Ostatecznie współczynnik sprężystości sekcji wynosi:

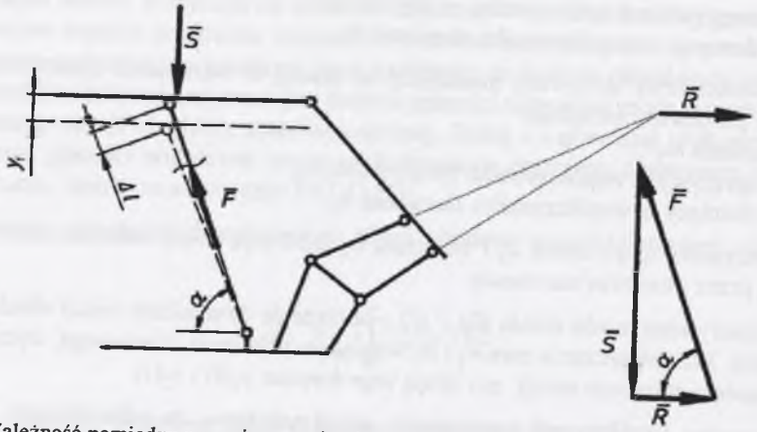
$$c_1 = c_s \cdot \sin^2\alpha \tag{4.16}$$

gdzie:

c_s – współczynnik sprężystości stojaka.

Współczynnik tłumienia b_1 wyznacza się korzystając z analizy modelu parametrycznego sygnału przyspieszenia. Budowa i właściwości modelu parametrycznego przyspieszenia stropnicy oraz sposób wyznaczania parametrów modalnych – tzn. zbiorów częstości własnych $\omega_{0,r}$ oraz odpowiadających im współczynników tłumienia modalnego δ_r – zostaną szczegółowo omówione w rozdziale 6.3.2.

[1] Sposób oszacowania tej masy oraz wyniki obliczeń dla warunków, w jakich przeprowadzono pomiary, omówiono szczegółowo w rozdziale 6.2.3.



Rys. 4.8. Zależność pomiędzy przemieszczeniami stropnicy a zmianą długości stojaka
Fig. 4.8. Relationship between displacements of the canopy and changes in the length of leg

Związek pomiędzy współczynnikiem tłumienia b_r modelu a współczynnikiem tłumienia modalnego δ_r określa wzór:

$$\delta_r = -\frac{b_r}{2\,m_r}; \qquad r = 1,\ 2. \tag{4.17}$$

Stąd:

$$b_r = -2\,m_r\,\delta_r; \qquad r = 1,\ 2. \tag{4.18}$$

gdzie:

m_r – masy skupione modelu układu mechanicznego,
δ_1 – współczynnik tłumienia modalnego odniesiony do pierwszej częstości własnej,
δ_2 – współczynnik tłumienia modalnego odniesiony do drugiej częstości własnej.

Związek pomiędzy współczynnikiem sprężystości c_2 a częstością własną $\omega_{0,2}$ przyjmuje postać:

$$c_2 = \omega_{0,2}^2 \cdot m_2 \tag{4.19}$$

Tak więc parametry modelu fizycznego sekcji uzależnione są od typu sekcji obudowy zmechanizowanej i wysokości wyrobiska oraz, poprzez wyniki pomiarów wykonanych w wyrobisku, od czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji w miejscu pomiarów.

4.2.2. Wyznaczanie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji

Model matematyczny, opisujący ruch mas m_1 i m_2 (rys. 4.7) wokół ich położenia równowagi, wymuszonego przez statyczne oddziaływanie górotworu na sekcję, przyjmuje postać układu równań:

$$\left.\begin{aligned} &m_2\,\ddot{y}_2(t) + b_2\big(\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)\big) + c_2\big(y_2(t) - y_1(t)\big) = P_z(t) \\ &m_1\ddot{y}_1(t) + (b_1 + b_2)\dot{y}_1(t) - b_2\dot{y}_2(t) + (c_1 + c_2)y_1(t) - c_2 y_2(t) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{4.20}$$

Po zastosowaniu przekształcenia Laplace'a funkcji $y_1(t)$, $y_2(t)$ i $P_z(t)$ przy zerowych warunkach początkowych, układ równań (4.20) sprowadza się do układu równań liniowych:

$$\left.\begin{aligned} &-Y_1(s)\,[b_2\,s + c_2] + Y_2(s)\,[m_2\,s^2 + b_2\,s + c_2] = \mathcal{P}_z(s) \\ &Y_1(s)\,[m_1\,s^2 + (b_1 + b_2)\,s + c_1 + c_2] - Y_2(s)\,[b_2\,s + c_2] = 0 \end{aligned}\right\} \tag{4.21}$$

gdzie:

$Y_1(s)$ – transformata Laplace'a przemieszczenia stropnicy:

$$Y_1(s) = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-st}\,y_1(t)\,\mathrm{d}t \tag{4.22}$$

$Y_2(s)$ – transformata Laplace'a przemieszczenia bryły górotworu obciążającej stropnicę:

$$Y_2(s) = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-st}\,y_2(t)\,\mathrm{d}t \tag{4.23}$$

$\mathcal{P}_z(s)$ – transformata Laplace'a obciążenia dynamicznego sekcji:

$$\mathcal{P}_z(s) = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-st}\,P_z(t)\,\mathrm{d}t \tag{4.24}$$

Przekształcając układ równań (4.21) wyznacza się transmitancję operatorową modelu, definiowaną jako iloraz transformaty Laplace'a przemieszczenia stropnicy (odpowiedzi układu) i transformaty obciążenia dynamicznego sekcji (wymuszenia układu) przy zerowych warunkach początkowych

$$\Phi_{1,z}(s) = \frac{Y_1(s)}{\mathcal{P}_z(s)} = \frac{c_2 + b_2\,s}{M_1} \tag{4.25}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} M_1 = {} & m_1\,m_2\,s^4 + [m_1\,c_2 + b_1\,b_2 + m_2(c_1 + c_2)]\,s^2 + c_1\,c_2 + \\ & + [m_1 b_2 + m_2(b_1 + b_2)]\,s^3 + (b_1 c_2 + b_2 c_1)\,s \end{aligned} \tag{4.26}$$

Po zastosowaniu w zależności (4.25) podstawienia:

$$s = \mathrm{j}\omega \tag{4.27}$$

gdzie:

$\mathrm{j}^2 = -1$,

wyznacza się transmitancję widmową – $\Phi_{1z}(\mathrm{j}\omega)$

$$\Phi_{1,z}(s)\big|_{s=\mathrm{j}\omega} = \Phi_{1,z}(\mathrm{j}\omega) = \frac{Y_1(\mathrm{j}\omega)}{\mathcal{P}_z(\mathrm{j}\omega)} = \frac{c_2 + b_2 \cdot \mathrm{j}\omega}{T_1 + U_1 \cdot \mathrm{j}} \tag{4.28}$$

gdzie:

$$T_1 = m_1\,m_2\,\omega^4 - [m_2\,c_1 + (m_1 + m_2)c_2 + b_1\,b_2]\,\omega^2 + c_1\,c_2 \tag{4.29}$$

$$U_1 = \omega\,\{b_1\,c_2 + b_2\,c_1 - [m_2\,b_1 + (m_1 + m_2)b_2]\,\omega^2\} \tag{4.30}$$

Korzystając z (4.28) otrzymano wyrażenie na transformatę Fouriera obciążenia dynamicznego sekcji w postaci:

$$\mathcal{P}_z(j\omega) = \frac{1}{\Phi_{1,z}(j\omega)} \mathcal{Y}_1(j\omega) \tag{4.31}$$

Bezpośredni pomiar pionowego przemieszczenia stropnicy jest, w warunkach panujących w wyrobisku ścianowym, bardzo trudny do zrealizowania. Dlatego też pionowe przemieszczenie stropnicy wyznaczono pośrednio, zakładając, że wpływ odkształcenia sprężystego osłony i łączników na przemieszczenie pionowe stropnicy jest pomijalnie mały. Zgodnie z powyższym założeniem przemieszczenie pionowe stropnicy jest funkcją zmiany siły w stojaku ujętej w formie zależności (4.32) wynikającej ze wzoru (4.15)

$$c_1 = \frac{F(t) \cdot \sin\alpha}{y_1(t)} \tag{4.32}$$

Stąd:

$$y_1(t) = \frac{\sin\alpha}{c_1} F(t) \tag{4.33}$$

Stosując przekształcenia Laplace'a funkcji $y_1(t)$ oraz $F(t)$ otrzymano:

$$\mathcal{Y}_1(s) = \frac{\sin\alpha}{c_1} \cdot \mathcal{F}(s) \tag{4.34}$$

gdzie:

$\mathcal{F}(s)$ - transformata Laplace'a siły w stojakach.

Po uwzględnieniu w zależności (4.34) podstawienia $s = j\omega$ oraz po przekształceniach wzór (4.31) przyjmuje postać:

$$\mathcal{P}_z(j\omega) = \frac{\sin\alpha}{c_1 \cdot \Phi_{1,z}(j\omega)} \mathcal{F}(j\omega) \tag{4.35}$$

W zastosowaniach praktycznych często rozpatruje się funkcje gęstości widmowej mocy obserwowanych sygnałów pobudzenia i odpowiedzi układu. Związek pomiędzy gęstością widmową mocy $S_{P_z}(\omega)$ sygnału obciążenia zewnętrznego a gęstością widmową mocy $S_F(\omega)$ sygnału siły w stojakach określa zależność (4.36) wynikająca ze wzoru (4.35)

$$S_{P_z}(\omega) = \frac{\sin^2\alpha}{c_1^2 \cdot |\Phi_{1,z}(j\omega)|^2} S_F(\omega) \tag{4.36}$$

Gęstość widmową mocy $S_F(\omega)$ sygnału siły w stojakach wyznaczono na podstawie przebiegu czasowego zmian siły w stojakach spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu.

Analizę wpływu wartości wielkości fizycznych wyznaczonych podczas pomiarów dołowych na transmitancje widmową modelu przedstawiono w rozdziale 7.1.2. Zależności (4.15) i (4.36) będą wykorzystane w rozdziale 7.2 do wyznaczenia gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji oraz wariancji tego obciążenia.

4.3. Metoda wyznaczania parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji działające od spągu

Analizując dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej od strony spągu przyjęto, że zjawisko dynamiczne wywołujące obciążenie dynamiczne sekcji występuje w warstwie tworzącej spąg wyrobiska. Z badań Szuścika wynika, na przykład, że eksplozyjne tąpanie spodkowe może wystąpić w warstwie węgla o grubości 0,5 m tworzącej spodek wyrobiska [87, 89]. Obciążenie dynamiczne przyłożone do spągnicy sekcji oddziałuje na górotwór naruszony tworzący strop wyrobiska powodując ruch bryły stropowej znajdującej się nad sekcją. Tak więc w rozpatrywanym przypadku dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję wymuszenie, działając od strony spągu, powoduje przemieszczenie bryły stropowej, natomiast zakłada się, że warstwa górotworu nienaruszonego pozostaje nieruchoma. W związku z powyższym ruch elementów rozpatrywanego modelu fizycznego sekcji określony jest względem górotworu nienaruszonego zalegającego nad wyrobiskiem.

4.3.1. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu

Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu przedstawiono na rys. 4.9.

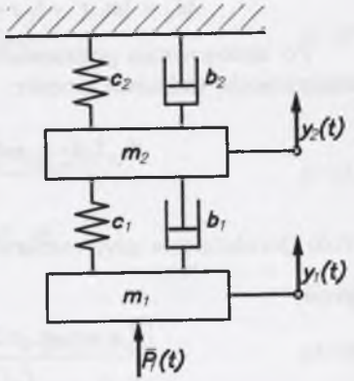
W modelu przedstawionym na rys. 4.9 właściwości sekcji obudowy zmechanizowanej charakteryzują:

- masa skupiona m_1 – równa masie sekcji zredukowanej do środka masy spągnicy,
- element sprężysty o współczynniku sprężystości c_1,
- element tłumiący o współczynniku tłumienia b_1.

Wartości współczynników b_1 i c_1 modelujących tłumienie sprężystości sekcji wyznacza się ze wzorów (4.16) i (4.18) przedstawionych w poprzednim rozdziale.

Masa skupiona m_2 modeluje bryłę stropową działającą na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Współczynniki sprężystości c_2 i tłumienia b_2 modelują więzy nałożone na ruch bryły o masie m_2 przez górotwór naruszony. Przyjęto, że wartości tych współczynników, podobnie jak w przypadku dynamicznego oddziaływania górotworu na stropnicę sekcji, zależą od parametrów drugiego modu dynamicznego – wzory (4.18) i (4.19). Na rozpatrywany model działa siła $P_f(t)$ - obciążenie dynamiczne sekcji od spągu.

Przemieszczenia mas m_1 i m_2 względem położenia równowagi, wymuszonego przez obciążenie statyczne sekcji określają współrzędne $y_1(t)$ i $y_2(t)$.



Rys. 4.9. Model fizyczny sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony spągu

Fig. 4.9. Physical model of a powered roof support unit exposed to dynamic action of the rock body coming from the floor

4.3.2. Wyznaczanie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji

Ruch mas m_1 i m_2 wokół ich położenia równowagi wymuszonego przez statyczne oddziaływanie górotworu na sekcję opisuje układ równań (4.37):

$$\left.\begin{aligned} m_1\ddot{y}_1(t)+b_1(\dot{y}_1(t)-\dot{y}_2(t))+c_1(y_1(t)-y_2(t))=P_f(t) \\ m_2\ddot{y}_2(t)+(b_1+b_2)\dot{y}_2(t)-b_1\dot{y}_1(t)+(c_1+c_2)y_2(t)-c_1y_1(t)=0 \end{aligned}\right\} \quad (4.37)$$

Powyższy model matematyczny sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu, po zastosowaniu przekształcenia Laplace'a funkcji $y_1(t)$, $y_2(t)$ i $P_f(t)$ przyjmuje, przy zerowych warunkach początkowych, postać układu równań liniowych (4.38)

$$\left.\begin{aligned} Y_1(s)\left[m_1 s^2+b_1 s+c_1\right]+Y_2(s)\left[b_1 s+c_1\right]=\mathcal{P}_f(s) \\ Y_2(s)\left[m_2 s^2+(b_1+b_2)s+c_1+c_2\right]-Y_1(s)\left[b_1 s+c_1\right]=0 \end{aligned}\right\} \quad (4.38)$$

Transmitancje operatorowe rozpatrywanego modelu określają wzory:

$$\Phi_{1,f}(s)=\frac{Y_1(s)}{\mathcal{P}_f(s)}=\frac{m_2 s^2+(b_1+b_2)s+c_1+c_2}{M_2} \quad (4.39)$$

$$\Phi_{2,f}(s)=\frac{Y_2(s)}{\mathcal{P}_f(s)}=\frac{b_1 s+c_1}{M_2} \quad (4.40)$$

gdzie:

$$M_2=(m_1 s^2+b_1 s+c_1)\left[m_2 s^2+(b_1+b_2)s+c_1+c_2\right]-(b_1 s+c_1)^2 \quad (4.41)$$

Po zastosowaniu podstawienia $s=\mathrm{j}\omega$ w zależnościach (4.39) i (4.40) otrzymuje się transmitancje widmowe modelu:

$$\Phi_{1,f}(s)\big|_{s=\mathrm{j}\omega}=\Phi_{1,f}(\mathrm{j}\omega)=\frac{c_1+c_2-m_2\omega^2+(b_1+b_2)\mathrm{j}\omega}{T_2+\mathrm{j}U_2} \quad (4.42)$$

$$\Phi_{2,f}(s)\big|_{s=\mathrm{j}\omega}=\Phi_{2,f}(\mathrm{j}\omega)=\frac{c_1+b_1\mathrm{j}\omega}{T_2+\mathrm{j}U_2} \quad (4.43)$$

gdzie:

$$T_2=m_1 m_2\omega^4-\left[c_1(m_1+m_2)+c_2 m_1+b_1 b_2\right]\omega^2+c_1 c_2 \quad (4.44)$$

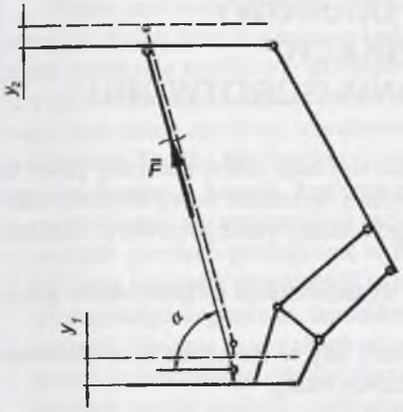
$$U_2=\omega\left\{b_1 c_2+b_2 c_1-\omega^2\left[b_1(m_1+m_2)+b_2 m_1\right]\right\} \quad (4.45)$$

Odpowiedzią układu na wymuszenie – $P_f(t)$, wyznaczaną w trakcie pomiarów w wyrobisku, jest siła w stojakach – $F(t)$. Zakładając, że w trakcie dynamicznego oddziaływania górotworu na spągnice stropnica nie odrywa się od stropu, można związek pomiędzy siłą $F(t)$ a przemieszczeniami $y_1(t)$ i $y_2(t)$, opisującymi ruch modelu fizycznego sekcji (rys. 4.10), przedstawić w postaci zależności (4.46).

$$F(t)=c_s\left[y_1(t)-y_2(t)\right]\sin\alpha \quad (4.46)$$

gdzie:

c_s – współczynnik sprężystości stojaka.



Rys. 4.10. Zależność siły w stojaku od przemieszczenia stropnicy i spągnicy

Fig. 4.10. Dependence of force in legs on displacements of a canopy and of a base

Uwzględniając w powyższej zależności związek pomiędzy współczynnikiem sprężystości stojaka a współczynnikiem sprężystości sekcji otrzymano:

$$F(t)=\frac{c_1}{\sin\alpha}\left[y_1(t)-y_2(t)\right] \quad (4.47)$$

Po zastosowaniu przekształcenia Laplace'a oraz uwzględnieniu zależności (4.39) i (4.40) wzór (4.47) przyjmie postać:

$$\mathcal{F}(s)=\frac{c_1}{\sin\alpha}\left[\Phi_{1,f}(s)-\Phi_{2,f}(s)\right]\mathcal{P}_f(s) \quad (4.48)$$

gdzie:

$\mathcal{F}(s)$ – transformata siły w stojakach.

Korzystając z podstawienia $s=\mathrm{j}\omega$ i przekształceń analogicznych do opisanych w rozdziale 4.2.2, otrzymuje się zależność pomiędzy gęstością widmową mocy $S_{Pf}(\omega)$ sygnału siły $P_f(t)$ działającej na spągnicę a gęstością widmową mocy $S_F(\omega)$ sygnału siły w stojakach

$$S_{Pf}(\omega)=\frac{\sin^2\alpha}{c_1^2\left|\Phi_{12,f}(\mathrm{j}\omega)\right|^2}S_F(\omega) \quad (4.49)$$

gdzie:

$$\Phi_{12,f}(\mathrm{j}\omega)=\Phi_{1,f}(\mathrm{j}\omega)-\Phi_{2,f}(\mathrm{j}\omega) \quad (4.50)$$

Uwzględniając zależności (4.42) – (4.45) otrzymano:

$$\left|\Phi_{12,f}(\mathrm{j}\omega)\right|^2=\frac{(m_2^2+b_2^2)\omega^2+2c_2 m_2\omega+c_2^2}{T_2^2+U_2^2} \quad (4.51)$$

Ostatecznie moduł transmitancji widmowej (inaczej: charakterystykę amplitudową) określa wzór:

$$\Phi_{12,f}(\omega)=\left|\Phi_{12,f}(\mathrm{j}\omega)\right|=\left[\frac{(m_2^2+b_2^2)\omega^2+2c_2 m_2\omega+c_2^2}{T_2^2+U_2^2}\right]^{0,5} \quad (4.52)$$

Analizę wpływu wartości wielkości fizycznych wyznaczonych podczas pomiarów dołowych na moduł transmitancji widmowej modelu przedstawiono w rozdziale 7.1.3. Zależności (4.14), (4.49) i (4.51) zastosowano w rozdziale 7.3 pracy do wyznaczenia gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji działającego od spągu oraz jego wariancji.

5. BADANIA OBCIĄŻENIA SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ W WARUNKACH DYNAMICZNEGO ODDZIAŁYWANIA GÓROTWORU

Podstawowym źródłem informacji niezbędnych do realizacji celów niniejszej pracy są wyniki badań obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej wykonane w wyrobiskach ścianowych, w których występowały zjawiska dynamicznego oddziaływania górotworu. Zebranie danych niezbędnych do:

- identyfikacji parametrów modeli sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu,
- identyfikacji parametrów charakteryzujących zmiany siły w stojakach spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej,
- identyfikacji rodzaju obciążenia dynamicznego sekcji,
- analizy wpływu czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji oraz przebieg czasowy siły w stojakach,

wymaga opracowania odpowiedniej metodyki postępowania badawczego i zastosowania specjalnego układu pomiarowego przystosowanego do długotrwałych pomiarów w warunkach eksploatacji górniczej.

Metodyka pomiarów dołowych stosowana dotychczas polegała na pomiarze ciśnienia w przestrzeni podtłokowej stojaków hydraulicznych. Przedmiotem badań było najczęściej obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej sprowokowane poprzez strzelanie. Analizując wyniki tak przeprowadzonych badań, można wyznaczyć przebiegi czasowe siły w stojakach, spowodowane odpaleniem określonego ładunku materiału wybuchowego. Identyfikacja rodzaju obciążenia dynamicznego sekcji czy też identyfikacja parametrów modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu nie jest możliwa na podstawie wyników dotychczas prowadzonych badań. Określenie wpływu poszczególnych czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji, wymienionych w rozdziale 3. pracy, na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej również wymaga prowadzenia pomiarów w wyrobisku przez czas znacznie dłuższy od czasu wykonywania pomiarów obciążenia obudowy wskutek strzelania.

Reasumując: pomiary wykonywane według dotychczas stosowanej metodyki badań nie są wystarczające do realizacji celów niniejszej pracy.

5.1. Metodyka postępowania badawczego

Realizacja celów sformułowanych w rozdziale 3. niniejszej pracy wymaga opracowania nowej metodyki postępowania badawczego uwzględniającej:

- wybór miejsca badań, charakteryzującego się dużym prawdopodobieństwem wystąpienia obciążenia dynamicznego sekcji, spowodowanego samoistnym zjawiskiem dynamicznym,
- równoczesny pomiar przebiegów czasowych siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy,
- konieczność prowadzenia długotrwałych pomiarów w warunkach eksploatacji górniczej.

Wybór zarówno wyrobiska ścianowego, jak i konkretnej sekcji obudowy zmechanizowanej, na której przeprowadzone będą pomiary, jest bardzo istotnym czynnikiem warunkującym uzyskanie wyników – zarejestrowanie zmian siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu. Wybór wyrobiska ścianowego oraz sekcji obudowy zmechanizowanej w tym wyrobisku konsultowano szczegółowo w Zakładzie Tąpań i Mechaniki Górotworu Głównego Instytutu Górnictwa oraz w działach tąpań wskazanych kopalń. Analizowano następujące czynniki:

- częstotliwość występowania wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu,
- warunki górniczo-geologiczne w miejscu przeprowadzenia pomiarów, takie jak np.: lokalizacja krawędzi eksploatacji w pokładach zalegających powyżej czy usytuowanie stref szczególnego zagrożenia tąpaniami,
- wartość ciśnienia w stojakach sekcji,
- skutki dynamicznego oddziaływania górotworu obserwowane w wyrobisku (odspajanie górnych naroży pokładu, uszkodzenia elementów sekcji itp.),
- ograniczenia wynikające z możliwości zabudowania czujników siły w stojaku oraz możliwości zasilania aparatury i transmisji danych na powierzchnię.

Pomiary obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej należy prowadzić w wyrobiskach, w których są zapewnione poprawne warunki utrzymania stropu. Dlatego po ustaleniu lokalizacji miejsca wykonywania pomiarów należy przeprowadzić obliczenia sprawdzające stan utrzymania stropu wyrobiska. Celem tych obliczeń jest:

- wyznaczenie wskaźnika utrzymania stropu wyrobiska dla sprawdzenia, czy badana sekcja obudowy zmechanizowanej zapewnia dobre warunki utrzymania stropu wyrobiska [7, 10],
- określenie wartości siły F_o równoważącej obciążenie statyczne wyrobiska, definiowanej jako wypadkowa siła występująca w stojakach, przy założeniu że jedynie sekcja obudowy zmechanizowanej równoważy maksymalne statyczne obciążenie wyrobiska Q_w, wyznaczane z teorii dopuszczalnego zaciskania wyrobiska [6].

Przedmiotem niniejszej pracy nie jest bowiem wyznaczenie obciążenia działającego na sekcję w następstwie nieprawidłowej współpracy obudowy zmechanizowanej z górotworem (na przykład wskutek łamania się warstwy stropu bezpośredniego zawisającej na odcinku kilkunastu metrów za sekcją obudowy zmechanizowanej [74]), skutkującej zmianami siły w stojakach sekcji, których intensywność, zgodnie ze stwierdzeniami zawartymi w rozdziale 3, charakteryzuje obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej.

Montaż aparatury pomiarowej w wytypowanej sekcji obudowy zmechanizowanej każdorazowo poprzedzano badaniami kontrolnymi poprawności działania całego układu pomiarowego w warunkach laboratoryjnych. Celem uzyskania porównywalnej podporności sekcji, w której zamontowano aparaturę pomiarową, oraz sekcji sąsiednich zalecono rozpieranie stojaków tych sekcji do ciśnienia wstępnego o tej samej wartości. Wartość ciśnienia w stojakach sekcji badanej i sekcji sąsiednich kontrolowano za pomocą manometrów sprężystych. Zgodnie z ustaleniami podanymi w pracy [94] ciśnienia w stojakach sekcji kontrolowano na odcinku ściany obejmującym 5 sekcji.

Bardzo istotnym czynnikiem warunkującym sprawne działanie układu pomiarowego jest staranne zabezpieczenie aparatury, a szczególnie wszystkich przewodów przed uszkodzeniem, zwłaszcza w trakcie przesuwania sekcji.

Z uwagi na ograniczenie liczby osób przebywających w rejonie szczególnego zagrożenia tąpaniami osoby wykonujące pomiary obciążenia dynamicznego sekcji nie pełniły stałych

dyżurów w wyrobisku. Ich obecność w ścianie ograniczono do czasu wykonywania pomiarów wysuwu rdzenników celem wyznaczenia wysokości sekcji, odczytu ciśnień wskazywanych przez manometry sprężyste zabudowane w stojakach, pomiarów kontrolnych sygnału siły w stojakach, jak również do drobnych napraw aparatury pomiarowej.

Zasadnicza część rejestracji wyników pomiarów i obserwacji odbywała się na powierzchni. W szczególności notowano:
- czas rozpoczęcia i zakończenia operacji technologicznej urabiania calizny,
- czas rozpoczęcia cyklu przestawiania sekcji obudowy w nowe położenie,
- czas i przyczyny zmian wartości siły w stojakach badanej sekcji, spowodowanych sterowaniem sekcją,
- stan stropu i czoła ściany w rejonie badanej sekcji,
- czas wystąpienia wstrząsu w rejonie ściany, jego energię i lokalizację ogniska,
- informacje szczegółowe o skutkach dynamicznego oddziaływania górotworu w rejonie ściany,
- czas przerw w zasilaniu aparatury oraz ewentualnych jej napraw,
- czas przeprowadzenia oraz wyniki pomiarów wysuwu rdzenników,
- czas przeprowadzenia oraz wyniki pomiarów kontrolnych.

W trakcie pomiarów w wyrobisku sygnały pomiarowe zapisywano na taśmie magnetycznej. Wstępny etap opracowania wyników polegał na wizualizacji przebiegów czasowych zarejestrowanych sygnałów pomiarowych i naniesieniu na sporządzone wykresy informacji o wszystkich zdarzeniach odnotowanych w dzienniku pomiarów, a dotyczących stanu pracy sekcji i zjawisk dynamicznych w rejonie ściany. Przeanalizowanie zarejestrowanych zmian wartości sygnałów pomiarowych siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy wraz z informacjami o czasie wystąpienia np. wstrząsów górotworu umożliwia wyselekcjonowanie fragmentów przebiegów czasowych sygnałów pomiarowych, które archiwizuje się oddzielnie. Taki sposób postępowania ułatwia późniejsze opracowanie wyników pomiarów i umożliwia prowadzenie ciągłej rejestracji sygnałów pomiarowych w okresie liczonym w tygodniach pomimo dysponowania ograniczoną liczbą nośników danych służących do rejestracji sygnałów pomiarowych.

Celem ostatecznego opracowania wyników pomiarów zarchiwizowane sygnały pomiarowe zapisano w postaci plików cyfrowych stosując częstotliwość próbkowania dobraną według twierdzenia Shanona o próbkowaniu sygnałów uwzględniając pasmo przenoszenia zastosowanego toru pomiarowego.

Każda seria pomiarowa obejmuje dwa równocześnie zarejestrowane przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych:
- sumaryczny sygnał z czujników siły w stojakach,
- sygnał z czujnika przyspieszenia stropnicy.

Przed przystąpieniem do ostatecznego opracowania wyników pomiarów spośród zarchiwizowanych serii pomiarowych wyselekcjonowano serie pomiarowe zawierające przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych zarejestrowanych podczas dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej.

Zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 3 niniejszej pracy przyjęto, że przebiegi czasowe wielkości mierzonych spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu spełniają następujące warunki:

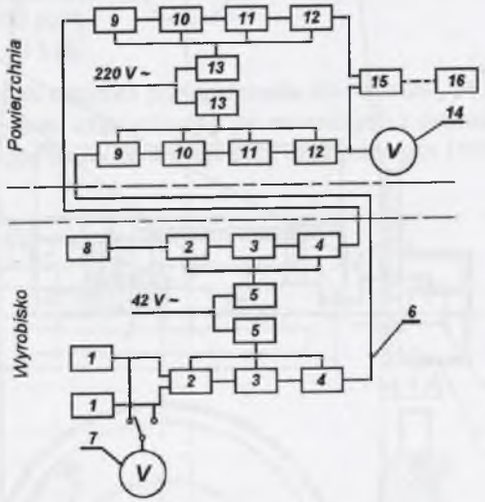
- współczynnik sygnał/szum jest większy od 5,0 [32]. Oznacza to, że zakłócenia sygnału pomiarowego nie mogą być większe od 20% maksymalnego zarejestrowanego przyrostu sygnału,
- średnie tempo przyrostu siły w stojakach jest co najmniej 1,25-krotnie większe od maksymalnej wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach podczas rozpierania sekcji,
- czas narastania sygnału pomiarowego siły w stojakach jest dłuższy od 0,01 s.

Spośród serii pomiarowych zawierających przebiegi czasowe wielkości mierzonych, spełniające wyżej wymienione warunki, wyróżniono następnie, w sposób opisany w rozdziale 4.1, serie pomiarowe, podczas których obciążenie dynamiczne sekcji działało od stropu oraz serie pomiarowe, podczas których obciążenie dynamiczne sekcji działało od spągu.

Parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej oraz wpływ czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji, wymienionych w rozdziale 3. niniejszej pracy, na ich wartość przeanalizowano osobno dla wyróżnionych dwóch rodzajów obciążenia dynamicznego sekcji.

5.2. Układ pomiarowy

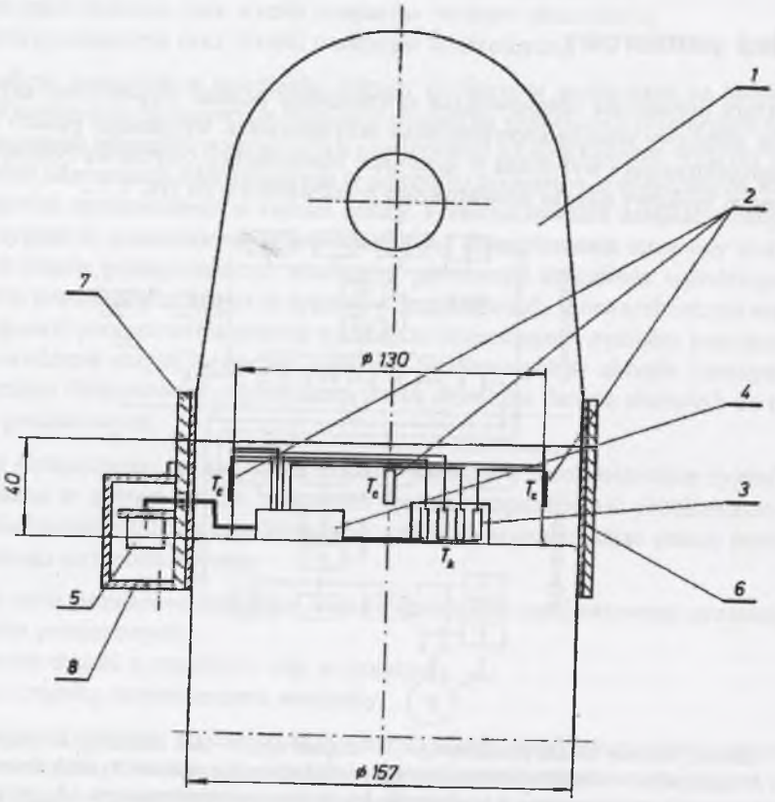
Aparatura pomiarowa umożliwiająca równoczesny pomiar wypadkowej siły w stojakach sekcji obudowy zmechanizowanej oraz przyspieszenia wybranego punktu stropnicy została zaprojektowana i wykonana w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu pomiarowego: 1 – czujnik siły, 2 – blok centralny, 3 – przetwornik U/f, 4 – nadajnik, 5 – zasilacz iskrobezpieczny, 6 – linia dwuprzewodowa, 7 – woltomierz przenośny, 8 – czujnik przyspieszenia, 9 – odbiornik, 10 – bariera optoelektroniczna, 11 – przetwornik f/U, 12 – wzmacniacz wyjściowy, 13 – zasilacz, 14 – woltomierz, 15 – magnetofon pomiarowy, 16 – rejestrator szybkopiszący

Fig. 5.1. Block diagram of the measuring system: 1 – force sensor, 2 – central unit, 3 – transducer U/f, 4 – transmitter, 5 – intrinsically-safe power pack, 6 – twin cable, 7 – portable voltmeter , 8 – acceleration sensor, 9 – receiver, 10 – optoelectronic barrier, 11– transducer f/U, 12 – output amplifier, 13 – power pack, 14 – voltmeter, 15 – measuring magnetophone, 16 – quick-acting recorder

W trakcie pomiarów stosowano dwa rodzaje czujników siły w stojakach. Początkowo siłę w stojakach mierzono tensometrycznym czujnikiem zabudowanym w rowku przedłużacza mechanicznego stojaka (rys. 5.2), stosowanym również podczas badań w KWK „Bobrek" [27, 95, 97]. Tensometry czynne i kompensacyjne, naklejone w rowku przedłużacza mechanicznego stojaka hydraulicznego i połączone przewodami w układ pełnego mostka, podłączono do wzmacniacza tensometrycznego. Wzmacniacz oraz tensometry zabezpieczono przed wpływem wilgoci nitrogumą NG-150 firmy Hottinger. Sygnał wyjściowy przekazywany jest ze wzmacniacza do gniazdka (5) zabezpieczonego przed uszkodzeniem mechanicznym za pomocą osłony gniazdka (8), przymocowanej do osłony (7) czterema śrubami M10×15. Zsumowany sygnał pomiarowy z czujników zabudowanych na stojakach sekcji obudowy zmechanizowanej przesyłano na powierzchnię linią telefoniczną i tam rejestrowano na magnetofonie pomiarowym typu 7005 firmy Brüel & Kjaer. Wzorcowanie układu pomiarowego przeprowadzono w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej oraz w CMG KOMAG na stanowisku do badań stojaków hydraulicznych. Wyniki wzorcowania zamieszczono w [95].



Rys. 5.2. Czujnik siły zabudowany w przedłużaczu mechanicznym stojaka: 1 – przedłużacz mechaniczny, 2 – tensometry czynne, 3 – blok tensometrów kompensacyjnych, 4 – wzmacniacz tensometryczny, 5 – gniazdko, 6 – osłona gumowa, 7 – osłona, 8 – osłona gniazdka

Fig. 5.2. Force sensor built in the mechanical extension piece of a leg: 1 – mechanical extension piece, 2 – active extensometers, 3 – block of compensatory extensometers, 4 – strain gauge amplifier, 5 – socket, 6 – rubber guard, 7 – guard, 8 – socket cover

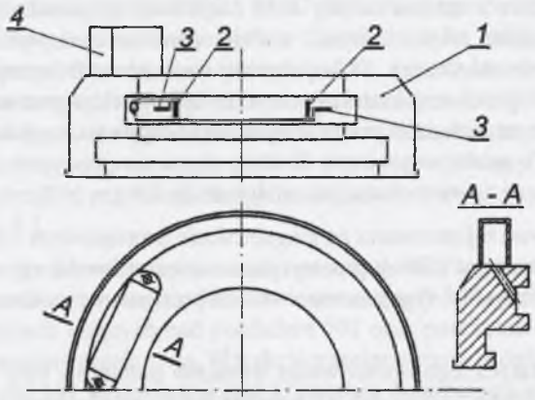
Ze względu na konieczność angażowania pracowników kopalni do transportu aparatury pomiarowej do wyrobiska oraz do wymiany przedłużaczy mechanicznych stojaków zabudowanych w sekcji na przedłużacze z zamontowanymi czujnikami siły, a przede wszystkim z uwagi na ograniczenie wyboru miejsca wykonywania badań do ścian o wysokości umożliwiającej wysunięcie przynajmniej jednego stopnia przedłużacza mechanicznego stojaka z rdzennika, w późniejszych etapach pracy stosowano tensometryczne czujniki siły (rys. 5.3), w których elementem pomiarowym są półpierścienie mocujące przedłużacz mechaniczny do rdzennika [28].

Tensometry czynne (2) naklejone są w rowku specjalnie wytoczonym na powierzchni wewnętrznej półpierścienia (1). W rowku tym są również naklejone tensometry kompensacyjne (3). Przewody łączące tensometry ze wzmacniaczem wyprowadzone są otworem wykonanym w półpierścieniu (1) bezpośrednio pod obudową wzmacniacza tensometrycznego (5) przymocowaną śrubami do górnej powierzchni półpierścienia (1). Wzmacniacz połączony jest z blokiem centralnym nadajnika linii za pomocą przewodu ekranowanego.

Pomiary laboratoryjne (jak również analiza teoretyczna problemu) wykazały, że pionowe przemieszczenie dna rowka (tzn. powierzchni, na której naklejono tensometry) jest liniowo zależne od osiowego obciążenia zewnętrznego działającego na półpierścień. Czujniki opisane wyżej wzorcowano na stanowisku do badań stojaków hydraulicznych w CMG KOMAG. Wyniki badań czujników w warunkach laboratoryjnych zamieszczono w [103]. Stwierdzono, że całkowity błąd pomiaru wynosi co najwyżej 4%.

Pionową składową przyspieszenia stropnicy mierzono za pomocą czujnika typu KB-1a charakteryzującego się następującymi parametrami:
- zakres pomiarowy $0 \div 100\ ms^{-2}$,
- pasmo częstotliwości $0 \div 1$ kHz.

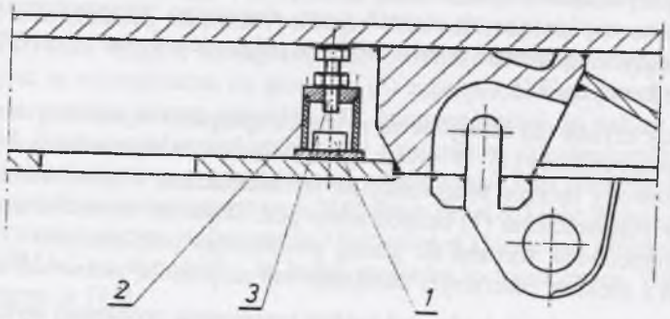
Analizując charakterystyki czujnika przyspieszenia stwierdzono, że błąd liniowości nie przekracza 1%, natomiast pasmo częstotliwości przenoszonych z dokładnością 5% wynosi od 1 do 900 Hz (szczyt rezonansowy występuje przy częstotliwości 1900 Hz).



Rys. 5.3. Czujnik siły zabudowany w półpierścieniu mocującym przedłużacz mechaniczny: 1 – półpierścień mocujący przedłużacz do rdzennika, 2 – tensometr czynny, 3 – tensometr kompensacyjny, 4 – obudowa wzmacniacza

Fig. 5.3. Force sensor built in a mounting half-ring of the mechanical extension piece: 1 – half-ring used to mount the extension piece to the inner tube, 2 – active extensometer, 3 – compensatory extensometer, 4 – amplifier casing

Sposób mocowania czujnika w stropnicy przedstawiono na rys. 5.4. Czujnik przyspieszenia (1) jest przymocowany śrubami do dolnej podstawy osłony (2). Śruba (3), wkręcona jednym końcem w podstawę osłony (2), służy do rozpierania osłony wraz z czujnikiem pomiędzy poszyciem dolnym i górnym stropnicy.



Rys. 5.4. Sposób mocowania czujnika przyspieszenia w stropnicy: 1 – czujnik przyspieszenia, 2 – osłona, 3 – śruba rozporowa

Fig. 5.4. Method of fastening of an acceleration sensor to the canopy: 1 – acceleration sensor, 2 – guard, 3 – spring bolt

Aparatura montowana w wyrobisku jest przystosowana do prowadzenia pomiarów w wyrobiskach zagrożonych wybuchem metanu. Poszczególne bloki układu pomiarowego wyposażono w bariery i inne zabezpieczenia umożliwiające prowadzenie pomiarów w polach metanowych. Blok centralny (rys. 5.1 poz.2), do którego podłączone są czujniki siły w stojakach, umożliwia wykonanie kontrolnych pomiarów sygnału pomiarowego bezpośrednio w wyrobisku. Wykorzystuje się w tym celu przenośny woltomierz podłączany kolejno do poszczególnych gniazd wyjściowych. W przypadku awarii ułatwia to zlokalizowanie uszkodzonego przetwornika.

Sygnały pomiarowe z czujników siły oraz czujnika przyspieszenia przesyłano na powierzchnię dwoma liniami telefonicznymi, wydzielonymi na czas wykonywania pomiarów z kopalnianej sieci teletechnicznej. W kopalnianej sieci teletechnicznej mogą występować zakłócenia, w istotny sposób zniekształcające przebieg sygnałów pomiarowych [33]. Dlatego też w opracowanym układzie pomiarowym wykorzystano modulację częstotliwości. Częstotliwość nośna sygnału, wynosząca 10 kHz, zapewnia poprawne przenoszenie sygnału przez kopalnianą sieć teletechniczną na odległość do 10 km [67].

Sygnały pomiarowe rejestrowano na magnetofonie pomiarowym typu 7005 firmy Brüel & Kjaer, którego parametry metrologiczne (pasmo częstotliwości rejestrowanego sygnału 0 ÷ 1,25 kHz, współczynnik sygnał/szum – 40 dB) zapewniają wierne ich rejestrowanie i odtwarzanie.

Przedmiotem ostatecznego opracowania wyników pomiarów były sygnały pomiarowe zapisane w postaci plików cyfrowych za pomocą karty pomiarowej typu Daq Book/100 o następujących danych technicznych:

- liczba wejść analogowych – 16,
- liczba wejść cyfrowych – 24,
- częstotliwość próbkowania – do 100 Hz,
- przetwornik A/D – 12-bitowy,

- liczba wejść analogowych – 2,
- napięcie wyjściowe – ± 5 V.

Przyjęto częstotliwość próbkowania sygnału f_s = 1 kHz. W związku z tym, zgodnie z twierdzeniem Shanona [32], zakres analizowanych częstotliwości sygnału pomiarowego jest ograniczony do częstotliwości granicznej – f_N:

$$f_N \leq \frac{f_s}{2} = 500 \text{ Hz} \tag{5.1}$$

Zakres częstotliwości 0 ÷ 500 Hz, wynikający z przyjętej częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego, obejmuje zarówno pasmo częstotliwości drgań własnych stropu (wynoszące wg [50] 4 ÷ 10 Hz), jak również częstotliwości drgań własnych sekcji obudowy zmechanizowanej oraz jej podzespołów. Pierwsza częstotliwość drgań własnych sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS-15/31-Oz wynosi bowiem 13,5 ÷ 15,6 Hz w zależności od wysokości sekcji [101]. Wyższe częstotliwości drgań własnych tej sekcji, wynoszące: 23,8 Hz, 30,4 Hz, 73,0 Hz, 75,4 Hz, 79,5 Hz, 119,5 Hz, 121,4 Hz i 188,2 Hz [101], również mieszczą się w zakresie częstotliwości, wynikającym z przyjętej częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego.

Z punktu widzenia dokładności zastosowanej aparatury pomiarowej przyjęty zakres analizowanych częstotliwości sygnałów jest również poprawnie dobrany, ponieważ zastosowane czujniki przyspieszeń przenoszą drgania o częstotliwości 1 ÷ 900 Hz z dokładnością do 5%. Drgania o częstotliwości powyżej 900 Hz są rejestrowane ze znacznie większym błędem i dlatego zwiększanie częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego jest, z punktu widzenia zastosowanej aparatury pomiarowej, niecelowe.

5.3. Charakterystyka miejsca i obiektu badań

Pomiary obciążeń dynamicznych sekcji obudowy zmechanizowanej przeprowadzono w ramach projektu badawczego nr 9 9031 92 03 realizowanego pod kierunkiem autora niniejszej pracy. Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę miejsc i obiektów badań. Szczegółowe informacje dotyczące: przebiegu badań, warunków, w jakich wykonywano pomiary oraz zarejestrowanych wyników, zamieszczono w pracach [99, 100, 102, 103, 104, 105]. Biorąc pod uwagę czas wykonywania pomiarów oraz zmianę warunków górniczo - geologicznych na wybiegu ściany, wyróżniono 6 etapów pomiarów. Podstawowe informacje o warunkach górniczo - geologicznych panujących w miejscu wykonywania badań zestawiono w tabeli 5.1.

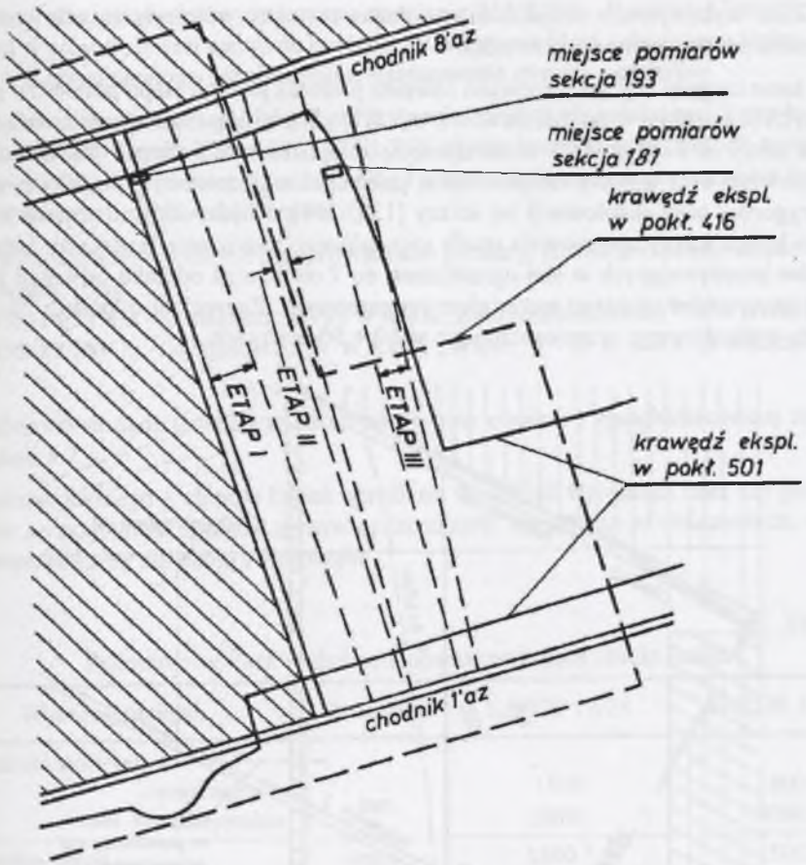
Usytuowanie miejsca pomiarów na wybiegu ściany N791, prowadzonej w pokładzie 502 w KWK „Zabrze-Bielszowice", przedstawiono na rys. 5.5. Zaznaczono rzuty krawędzi eksploatacji w pokładach leżących nad pokładem 502 oraz położenie sekcji nr 193, na której zamontowano aparaturę pomiarową. W trakcie trzeciego etapu badań aparaturę pomiarową przeniesiono na sekcję 181 usytuowaną pod krawędzią eksploatacji w pokładzie 501.

Wyróżnienie trzech etapów badań w ścianie N791 spowodowane zostało różnymi technologiami urabiania, stosowaną profilaktyka tąpaniową oraz przechodzeniem górnego odcinka ściany przez strefy o różnej koncentracji naprężeń pionowych wyznaczone w pracy [21]. W trakcie pierwszego etapu pomiarów pokład wybierano mechanicznie za pomocą dwóch kombajnów ścianowych typu KGS-320/2B-832. Dobowy postęp ściany ograniczono

Tabela 5.1

Zestawienie podstawowych informacji charakteryzujących warunki naturalne i techniczne w miejscach wykonywania pomiarów

Etap pomiarów	Kopalnia Ściana (pokład)	Średnia wysokość ściany [m]	Typ sekcji	Kierowanie stropem	Strop bezpośredni	Spąg	Technologia urabiania	Uwagi
I	„Bielszowice" N791 (502)	2,40 (sekcja 198)	FAZOS 15/31-Oz	Zawał	Łupek ilasty	Łupek ilasty	Kombajnowa	
II		2,13 (sekcja 181)					Kombajnowa	Oddziaływanie krawędzi eksploatacji w pokł. 416 (odl. 70 m)
III							Materiałem wybuchowym	Oddziaływanie krawędzi eksploatacji w pokł. 501 (odl. 17 m)
IV	„Wujek" IV (501)	2,2	FAZOS 12/28-Oz	Zawał	Piaskowiec	Węgiel (pokład 501)	Kombajnowa	Ściana prowadzona w warstwie przystropowej pokładu
V	„Śląsk" 8 (414/1)	2,3	FAZOS 15/31-Oz	Zawał	Łupek ilasty	Łupek ilasty	Materiałem wybuchowym	Stojaki i podpora stropnicy wyposażone w zawory upustowe
VI	„Porąbka – Klimontów" 758 (510)	2,6	FAZOS 12/28-Oz	Podsadzka hydrauliczna	Piaskowiec	Węgiel (pokład 510)	Kombajnowa	Ściana prowadzona w warstwie przystropowej pokładu



Rys. 5.5. Usytuowanie miejsca pomiarów w ścianie N791 pokładu 502

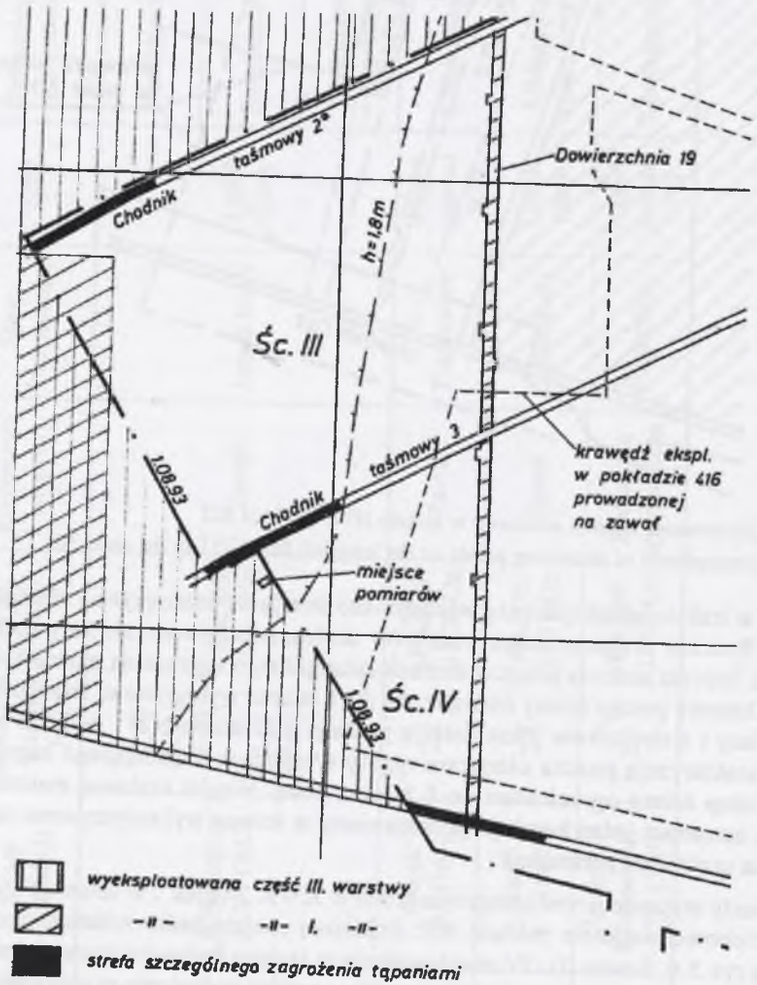
Fig. 5.5. Arrangement of measuring points on the longwall face N791 in the seam 502

do 2 m, a w trakcie badań tylko raz wykonywano strzelanie wstrząsowe z chodnika nadścianowego. Podczas drugiego etapu pomiarów urabianie odbywało się za pomocą jednego kombajnu, którym podczas pracy w strefach szczególnego zagrożenia można było sterować zdalnie. Dobowy postęp ściany zmniejszono do 1 m oraz wykonywano strzelania wstrząsowe ze ściany i z chodników. Eksploatację pokładu 502 ścianą N791 podczas trzeciej serii badań charakteryzują jeszcze ostrzejsze rygory wynikające z istniejącego zagrożenia tąpaniami. Postęp ściany ograniczono do 0,5 m na dobę. Węgiel urabiano materiałem wybuchowym, natomiast jeden kombajn pozostawiony w ścianie wykorzystywano wyłącznie do ładowania urobku na przenośnik.

Czwarty etap pomiarów przeprowadzono w KWK „Wujek", w ścianie IV usytuowanej w przystropowej warstwie pokładu 501. Położenie miejsca badań schematycznie przedstawiono na rys. 5.6. Ściany III i IV znajdowały się w zasięgu wpływów krawędzi wynikających z różnych systemów eksploatacji stosowanych w trakcie wybierania przystropowej warstwy pokładu 416. Odległość pionowa pokładu 501 od krawędzi wynosiła około 65 m. W polu wybiegu ścian III i IV występował również uskok o zrzucie 1,8 ÷ 3 m oraz dowierzchnia 19, zlikwidowana przez podsadzanie. Postęp ścian III i IV był skoordynowany. Pomiary siły

w stojakach wykonywano czujnikami zamontowanymi na półpierścieniach mocujących przedłużacz mechaniczny do rdzennika.

Te same czujniki siły zamontowano również podczas piątego etapu pomiarów przeprowadzonych w ścianie 8 w pokładzie 414/1 w KWK „Śląsk". Aparaturę pomiarową zabudowano na sekcji nr 84 (rys. 5.7). Silne tąpnięcia zarejestrowane podczas drążenia chodnika podścianowego oraz wpływy eksploatacji w pokładach sąsiednich były przyczyną wprowadzenia rygorów przy eksploatacji tej ściany [137, 138]. Między innymi odcinek od sekcji nr 80 do końca ściany obejmowała strefa szczególnego zagrożenia tąpaniami. Liczbę pracowników przebywających w niej ograniczono do 7 osób, a na odcinku od sekcji nr 85 do końca ściany węgiel urabiano materiałem wybuchowym. Zazwyczaj odpalano 20 ÷ 30 kg materiału wybuchowego rozmieszczonego w 60 ÷ 90 otworach.



Rys. 5.6. Usytuowanie miejsca pomiarów w ścianie IV w pokładzie 501 w KWK „Wujek"

Fig. 5.6. Arrangement of measuring points on the longwall face IV in the seam 501 at the „Wujek" Coal Mine

Szósty etap pomiarów wykonywano w ścianie 758 KWK „Porąbka-Klimontów" prowadzonej w przystropowej warstwie pokładu 510 w rejonie filara ochronnego szybu „Józef". Na rys. 5.8 przedstawiono schematycznie usytuowanie miejsca pomiarów.

Zgodnie z ustaleniami poczynionymi na posiedzeniach Kopalnianego Zespołu ds. Tąpań i Komisji ds. Tąpań ściany 756, 575 i 758 objęto kompleksową metodą oceny stanu zagrożenia [139]. Narzucono również szereg rygorów dotyczących prowadzenia ścian, postępu dobowego, ustępliwości frontów itp.

W wyrobiskach, w których przeprowadzano pomiary, stosowano sekcje obudowy zmechanizowanej typu:

- FAZOS-15/31-Oz – w ścianach: N791 w KWK „Zabrze-Bielszowice" i 8 w KWK „Śląsk",
- FAZOS-12/28-Oz – w ścianach: IV w KWK „Wujek" i 758 w KWK „Porąbka-Klimontów".

Podstawowe dane techniczne sekcji obu typów obudowy zmechanizowanej zestawiono w tabeli 5.2.

Podczas każdego z etapów badań określano wysokość wyrobiska oraz kąt pochylenia stojaków na podstawie pomiaru wysuwu rdzenników, zakładając w obliczeniach, że strop i spąg wyrobiska są do siebie równoległe.

Tabela 5.2

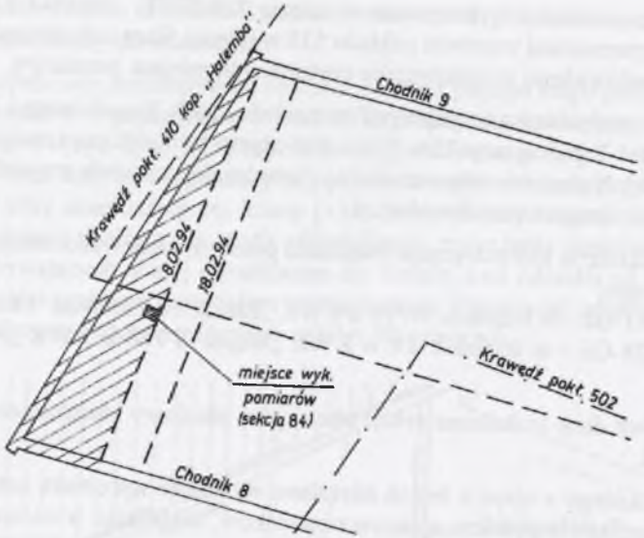
Podstawowe dane techniczne charakteryzujące obiekt badań

Wyszczególnienie	Jednostki	FAZOS 12/28	FAZOS 15/31
Wysokość stosowania [1]: – minimalna – maksymalna	mm	1500 2600	1800 3000
Podziałka sekcji	mm	1500 [2]	1500
Podporność sekcji	kN	1170÷2438	1305÷2770
Średnica cylindra stojaka	mm	200	200
Podporność stojaka: – wstępna – robocza	kN	785 1350	785 1350
Ciśnienie w stojaku: – wstępne – robocze	MPa	25 43	25 43
Ciśnienie otwarcia zaworu upustowego [3]	MPa		48
Typ zaworu upustowego w stojakach [3]		-	DBV-400
Typ zaworu upustowego w podporze stropnicy [3]		-	DBV-1325

[1] Dotyczy wyrobisk zagrożonych tąpaniami

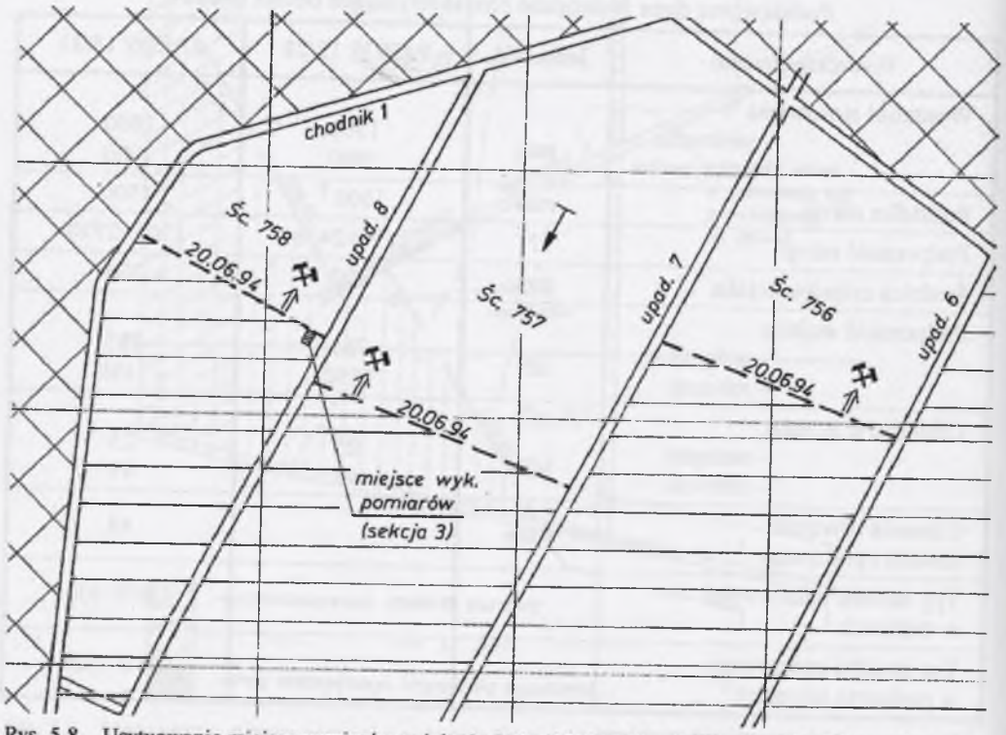
[2] Dotyczy tylko ściany prowadzonej na zawał

[3] Dotyczy tylko ściany 8 KWK „Śląsk"



Rys. 5.7. Usytuowanie miejsca pomiarów w ścianie 8 – pokład 414/1, KWK „Śląsk"

Fig. 5.7. Arrangement of measuring points on the longwall face 8 in the 414/1 seam at the „Śląsk" Coal Mine



Rys. 5.8. Usytuowanie miejsca pomiarów w ścianie 758 pokładu 510 w KWK „Porąbka-Klimontów"

Fig. 5.8. Arrangement of measuring points on the longwall face 758 in the 510 seam at the „Porąbka-Klimontów" Coal Mine

5.4. Analiza stanu utrzymania stropu wyrobiska w miejscu badań

Ponieważ przedmiotem niniejszej pracy nie są obciążenia działające na sekcję w następstwie nieprawidłowej współpracy obudowy zmechanizowanej z górotworem, lecz obciążenia dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, to przed przystąpieniem do badań przeprowadzono obliczenia sprawdzające stan utrzymania stropu w miejscu wykonywania pomiarów. Przedstawiając wyniki obliczeń wskaźnika nośności stropu, zachowano w niniejszym rozdziale oznaczenia wielkości fizycznych stosowane w pracy [3].

Zgodnie z teorią dopuszczalnego zaciskania wyrobiska miarą stanu utrzymania stropu wyrobiska jest wskaźnik nośności stropu g_n, oznaczany w pracach Bilińskiego symbolem g, wyznaczany z zależności [3]:

$$g_n = \frac{1}{\frac{0{,}65 \cdot z_{L1}}{z_g} + 0{,}3} \tag{5.2}$$

gdzie:

z_{L1} – jednostkowe nachylenie stropu [mm/m],

z_g – graniczna wartość nachylenia stropu [mm/m].

W wyniku wieloletnich pomiarów dołowych prowadzonych przez GIG uzależniono wartości jednostkowego i granicznego nachylenia stropu, występujące we wzorze (5.2) od warunków naturalnych i technicznych, otrzymując ostatecznie zależności:

– dla ścian prowadzonych na zawał:

$$g_n = \frac{1}{\frac{k_s^{0,5} \cdot h \cdot a_p}{\left(0{,}37 \frac{P \cdot L_w}{Q_j \cdot L_s} + 0{,}25\right) \cdot R_c^{0,5}} + 0{,}3} \tag{5.3}$$

– dla ścian prowadzonych na podsadzkę hydrauliczną:

$$g_n = \frac{1}{\frac{h_o}{\left(0{,}3 \frac{P}{Q_j} + 0{,}25\right) \sqrt{n_r \cdot a_{w1} \cdot R_c \cdot k_s}} + 0{,}3} \tag{5.4}$$

gdzie:

P – średnia jednostkowa podporność obudowy; [MN·m^{-1}],

h – wysokość ściany: [m],

k_s – współczynnik ściśliwości zrobów,

R_c – wytrzymałość skał stropowych na ściskanie; [MPa],

L_w – rozpiętość obudowanego stropu; [m],

L_s – rozpiętość wyrobiska ścianowego; [m],

a_p – współczynnik nierównomierności obciążenia wynikający z okresowego załamywania się stropu zasadniczego,

Q_j – obciążenie jednostkowe wyrobiska,

$$Q_i = Q + Q_t \tag{5.5}$$

Q – obciążenie statyczne wyrobiska; [MN·m^{-1}],
Q_t – dodatkowe obciążenie wyrobiska w ścianach zagrożonych wstrząsami górotworu; [MN·m-1],
h_o – wysokość „zera podsadzkowego"; [m],
n_r – współczynnik nierównomierności podparcia pola przyczołowego i pola przeznaczonego do podsadzania,
a_{w1} – współczynnik wpływu podebrania pokładu przez eksploatacje nieniszczące.

Obliczając wartość wielkości występujących we wzorach (5.3) i (5.4) korzystano z zależności empirycznych podanych w pracach [3, 4, 7 i 10]. Ilustrują one wpływ warunków górniczo-geologicznych na wartości wielkości niezbędnych do wyznaczenia wskaźnika nośności stropu. Informacje odnośnie do parametrów charakteryzujących warunki górniczo-geologiczne, uwzględnianych w obliczeniach, zestawiono w tabeli 5.3, natomiast wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 5.4. Oprócz jednostkowego obciążenia wyrobiska Q_p, średniej jednostkowej podporności obudowy P i wskaźnika nośności stropu podano również wartości: siły F_o równoważącej obciążenie statyczne wyrobiska i obciążenia statycznego wyrobiska Q.

Tabela 5.3

Parametry charakteryzujące warunki górniczo-geologiczne w badanych wyrobiskach wykorzystane w obliczeniach wskaźnika nośności stropu – g_n

Lp.	Wyszczególnienie		Sciana – Pokład / Etap pomiarów					
			N791–502			IV–501	8–414/1	758–510
			I	II	III	IV	V	VI
1	Głębokość eksploatacji	[m]	780			620	680	410
2	Wysokość ściany	[m]	2,4	2,1		2,2	2,3	2,6
3	Długość ściany	[m]	300			140	190	90
4	Nachylenie podłużne	[°]	10			4	4	0
5	Nachylenie poprzeczne	[°]	-			-	-	8
6	Rozpiętość wyrobiska	[m]	3,0			3,25	3,45	8,0
7	Postęp ściany	[m/d]	2	1	0,5	1,5	0,5	1,0
8	System kierowania stropem		zawał			zawał	zawał	podsadzka
9	Zero podsadzkowe	[m]	-			-	-	0,3
10	Laboratoryjna wytrzymałość węgla na ściskanie	[MPa]	12			25	15	20
11	Średnia laboratoryjna wytrzymałość stropu na ściskanie [1]	[MPa]	57,3			100	54,5	68
12	Laboratoryjna wytrzymałość spągu na ściskanie	[MPa]	30			25	30	20
13	Współczynnik wpływu ściśliwości zrobów		1,0			1,0	1,0	0,2
14	Podebranie pokładu		nie			nie	tak	nie
15	Osłabienie calizny węglowej: – nawadnianiem – strzelaniem wstrząsowym		 nie nie	 nie tak	 nie tak	 nie nie	 nie nie	 nie nie
16	Osłabienie stropu strzelaniem		nie	tak	tak	nie	nie	nie

ciąg dalszy tabeli 5.3

Lp.	Wyszczególnienie	Sciana – Pokład / Etap pomiarów					
		N791–502			IV–501	8–414/1	758–510
		I	II	III	IV	V	VI
17	Zawodnienie spągu Osłabienie sągu strzelaniem	nie nie	nie nie	nie tak	nie nie	nie nie	nie nie
18	Odprężenie górotworu wskutek wcześniejszej eksploatacji	tak			tak	nie	tak
19	Występowanie większych resztek calizny w zrobach pokładu bądź w ich otoczeniu	nie			nie	nie	nie
20	Występowanie uskoków na wybiegu ściany	nie			tak	nie	nie
21	Występowanie na wybiegu ściany rzutów krawędzi eksploatacji w pokładach sąsiednich	tak			tak	tak	nie
22	Zbliżanie się frontu ściany: – do zrobów, – do chodn. w pokł. lub otoczeniu	 nie nie			 nie tak	 nie nie	 tak nie
23	Stosowanie zmiennego kierunku eksploatacji	nie			nie	nie	nie
24	Obustronne otoczenie ściany zrobami	tak			nie	nie	nie
25	Faza rozruchu ściany	nie			nie	tak	nie
26	Występowanie grubych warstw materiałów sypkich w nadkładzie	nie			nie	nie	nie
27	Odległość środka warstwy generującej wstrząsy od stropu ściany	8			8,5	40	29
28	Prognozowana maksymalna energia wstrząsu [J]	$1 \cdot 10^6$			$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$

[1] Średnia ważona laboratoryjnej wytrzymałości skał zalegających w stropie do wysokości równej trzykrotnej wysokości wyrobiska [3].

Siłę równoważącą obciążenie statyczne wyrobiska – F_o wyznaczono ze wzoru (5.6) zakładając, że sekcja obudowy zmechanizowanej przenosi całkowite obciążenie statyczne działające na pas stropu wyrobiska (prostopadły do czoła ściany) o szerokości równej podziałce sekcji obudowy zmechanizowanej:

$$F_o = \frac{Q \cdot b}{i \cdot n_k} \tag{5.6}$$

gdzie:
Q – obciążenie statyczne wyrobiska,
b – podziałka sekcji obudowy,
i – liczba stojaków w sekcji,
n_k – współczynnik redukcyjny podporności sekcji [7].

Zgodnie z teorią dopuszczalnego zaciskania wyrobiska, wartości wskaźnika nośności stropu większe od 0,8 świadczą o poprawnych warunkach utrzymania stropu wyrobiska. W przypadku gdy $0,7 < g_n < 0,8$, warunki utrzymania stropu są utrudnione, natomiast dla

$g_n < 0,7$ w wyrobisku istnieje stan zagrożenia zawałem. Wyniki obliczeń wskaźnika nośności stropu zamieszczone w tabeli 5.4 wskazują na poprawne warunki utrzymania stropu wyrobiska w trakcie badań dołowych, z wyjątkiem trzeciego etapu pomiarów wykonywanych w ścianie N791 w sekcji nr 193, kiedy występują utrudnione warunki utrzymania stropu.

Tabela 5.4

Wyniki obliczeń obciążenia wyrobiska, średniej jednostkowej podporności obudowy, wskaźnika nośności stropu i siły równoważącej obciążenie statyczne wyrobiska

Wyszczególnienie	Ściana / Etap pomiarów					
	N791			IV	8	758
	I	II	III [1]	IV	V	VI
Obciążenie jednostkowe wyrobiska – Q_l [MN·m^{-1}]	0,980	1,040	1,080 0,962	1,100	1,010	0,250
Średnia jednostkowa podporność obudowy – P [MN·m^{-1}]	0,774	0,774	0,640 0,557	0,858	0,746	0,437
Wskaźnik nośności stropu – g_n	**0,970**	**0,870**	**0,763 0,830**	**1,060**	**1,010**	**1,520**
Obciążenie statyczne wyrobiska – Q_w [MN·m^{-1}]	0,515	0,546	0,566 0,502	0,582	0,542	0,134
Siła równoważąca obciążenie statyczne wyrobiska – F_o [MN]	0,848	0,917	0,953 0,867	0,955	0,892	0,352

[1] W całej kolumnie górne liczby dotyczą sekcji 193, a dolne sekcji 181.

Wartość wypadkowej siły w stojakach równoważącej statyczne obciążenia wyrobiska jest miarą obciążenia przenoszonego przez stojaki w warunkach statycznej współpracy obudowy z górotworem. Siła F_o jest w rozpatrywanych wyrobiskach mniejsza od siły w stojakach odpowiadającej nominalnemu ciśnieniu wstępnemu. Wynika stąd, że odnotowanie w trakcie pomiarów niewielkich wartości siły w stojakach, znacznie mniejszych od wartości siły odpowiadającej nominalnemu ciśnieniu wstępnemu, nie jest równoznaczne z wadliwym działaniem podpornościowego układu hydraulicznego sekcji.

5.5. Przebieg badań

Informacje dotyczące czasu rejestracji sygnałów pomiarowych zestawiono w tabeli 5.5. Wynika z nich, że czas przerw w rejestrowaniu sygnałów pomiarowych jest stosunkowo długi. Wyróżniono kilka przyczyn takiego stanu rzeczy. Po pierwsze: poczynając od drugiego etapu zrezygnowano z wykonywania pomiarów w te soboty i niedziele, kiedy ściana nie była obłożona. W opinii pracowników działu tąpań prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk dynamicznych w górotworze podczas tak długiego postoju ściany jest niewielkie. Wniosek powyższy potwierdzają również obserwacje dokonane podczas I etapu badań. Stwierdzono bowiem, że obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej występowało po upływie co najwyżej 180 min od chwili rozparcia stojaków po przemieszczeniu sekcji w nowe położenie.

Drugą z kolei przyczyną przerw w rejestrowaniu wyników pomiaru były uszkodzenia przewodów zasilających aparaturę pomiarową. W dwóch przypadkach zerwanie przewodów zasilających spowodowało uszkodzenie nadajnika linii. Łączny czas przerw rejestracji

Tabela 5.5

Czas rejestracji sygnałów pomiarowych podczas poszczególnych etapów badań

Etap	Data rozpoczęcia Data zakończenia	Czas rejestracji [h]	Uwagi
I	08.09.1992 19.09.1992	224	
	27.09.1992 28.09.1992	5	Pomiary obciążeń obudowy tylko podczas strzelań wstrząsowych
II	17.11.1992 25.11.1992	123	
	15.12.1992 16.12.1992	25	
III	11.01.1993 22.01.1993	191	
	26.01.1993 02.02.1993	166	Pomiary wykonywane w sekcji 181 tensometrycznymi czujnikami ciśnienia
IV	23.07.1993 06.08.1993	155	Przerwy w rejestracji spowodowane awarią nadajnika linii i przerwaniem przewodów zasilających czujniki
V	08.02.1994 18.02.1994	197	
VI	09.06.1994 09.06.1994	7	Częste przerwy w rejestracji sygnałów pomiarowych spowodowane awarią nadajnika i zrywaniem przewodów zasilających podczas podsadzania ściany
	14.06.1994 22.06.1994	144	

spowodowanych brakiem zasilania wynosił około 49 godzin. W trakcie badań odnotowano również jeden przypadek uszkodzenia czujników, spowodowany przerwaniem przewodów łączących czujniki z blokiem nadajnika, wskutek strzelania wykonywanego w ścianie.

W trakcie II i III etapu pomiarów wykonywanych w KWK „Zabrze-Bielszowice" wystąpiły trudności w utrzymaniu stropu bezpośredniego zniszczonego w wyniku często przeprowadzanych strzelań w ścianie. Przerwy w pomiarach spowodowane koniecznością wypełniania wyrw w stropie trwały łącznie 9 godzin, przy czym z uwagi na ograniczony postęp ściany bardzo się wydłużał czas, po którym sekcja, rozparta pod wyrwami w stropie zapełnionymi drewnem, zaczynała ponownie przenosić obciążenie spowodowane naciskiem górotworu. Niewielka wartość siły w stojakach, spowodowana rozparciem sekcji pod sztucznie wypełnionymi wyrwami w stropie, była przyczyną zakończenia II etapu pomiarów, jak również przeniesienia aparatury pomiarowej z sekcji nr 193 na sekcję 181 podczas III etapu pracy.

Po przeniesieniu aparatury pomiarowej na sekcję 181 z przyczyn technicznych (obniżona wysokość ściany) zastosowano inną metodę wyznaczania sił w stojakach sekcji. Czujniki mierzące siłę w przedłużaczu mechanicznym stojaka zastąpiono tensometrycznymi czujnikami mierzącymi ciśnienie w przestrzeni roboczej podpory hydraulicznej. Zastosowano czujniki typu TCWt firmy Carex charakteryzujące się następującymi danymi technicznymi:

- zakres pomiarowy – 0 ÷ 100 MPa,
- czułość – 1 mV/V,
- klasa czujnika – 0,1,
- opór wewnętrzny – 120 Ω.

Czujniki zabezpieczono przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz wyposażono w złączki ułatwiające ich zamontowanie w układzie hydraulicznym stojaka.

Zastosowanie tensometrycznych czujników ciśnienia umożliwiło pomiar siły w stojakach z całkowicie wsuniętym przedłużaczem mechanicznym. Jest to metoda uniwersalna, tym niemniej bardzo kłopotliwa przy długotrwałych pomiarach dołowych. Tensometryczne czujniki ciśnienia, z konieczności usytuowane blisko spągu, są, w porównaniu z czujnikami siły zabudowanymi nad rdzennikiem stojaka, znacznie bardziej narażone na uszkodzenia mechaniczne i zawilgocenie.

Oddzielnym problemem jest awaryjność aparatury pomiarowej w ścianie 758 prowadzonej na podsadzkę hydrauliczną. Zabezpieczenie układu pomiarowego przed uszkodzeniem podczas eksploatacji ściany na podsadzkę hydrauliczną jest bowiem znacznie trudniejsze niż w ścianie prowadzonej na zawał. Awaria układu nadajnika linii już podczas pierwszego podsadzania zbędnej części wyrobiska jest tego najlepszym dowodem. W trakcie przygotowania wyrobiska do podsadzania przerwano kable zasilające aparaturę pomiarową i podczas próby ich ponownego połączenia, podjętej przez załogę pracującą w ścianie, część aparatury uległa poważnemu uszkodzeniu. Usunięcie uszkodzenia wymagało wytransportowania całego układu pomiarowego na powierzchnię i naprawy elementów w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Łączny czas przerw związanych z brakiem zasilania w ścianie, zrywaniem przewodów zasilających oraz awarią aparatury wynosił 31,5 godziny. Przyczyną zakończenia pomiarów w ścianie 758 również było zwarcie w układzie nadajnika linii.

Pomimo przerw w pomiarach, spowodowanych przyczynami omówionymi powyżej, łączny czas rejestracji przebiegów czasowych sygnałów pomiarowych wynosił 1237 godzin.

Ostateczne opracowanie wyników pomiarów ograniczono do serii pomiarowych zawierających przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych zarejestrowanych podczas działania obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

W niniejszej pracy przyjęto, że obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej charakteryzuje średnie tempo przyrostu siły w stojakach, spełniające warunek (5.7):

$$w_{F,n} = \frac{0{,}8 \cdot (F_m - F_{st,p})}{t_n} > 1{,}25 \cdot w_{F,n,r,\max} \tag{5.7}$$

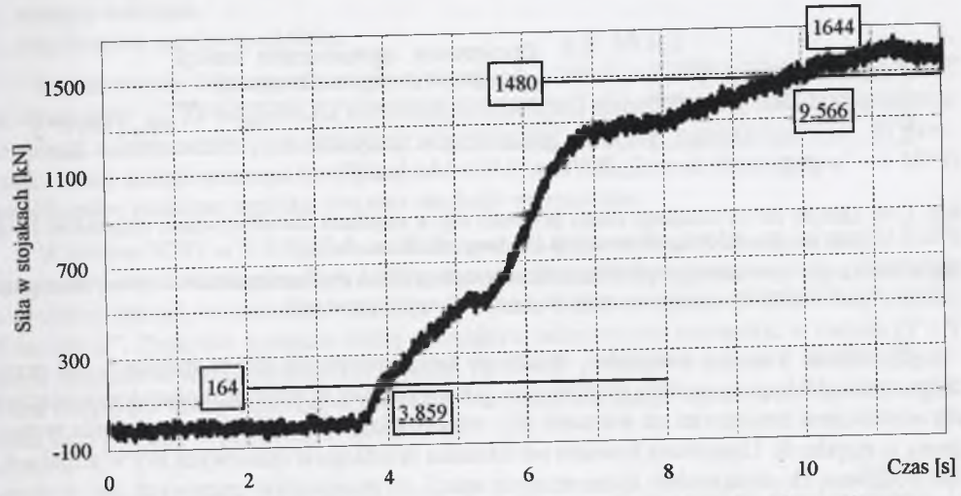
gdzie:

- $w_{F,n}$ – średnie tempo przyrostu siły w stojakach,
- F_m – maksymalna wartość siły w stojakach w trakcie rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji,
- $F_{st,p}$ – początkowa siła statyczna w stojakach,
- t_n – czas narastania obciążenia stojaka,
- $w_{F,n,r}$ – średnie tempo zmiany siły w stojakach podczas rozpierania sekcji,
- $w_{F,n,r,max}$ – maksymalna wartość średniego tempa zmiany siły w stojakach podczas rozpierania sekcji.

Przykład wyznaczania średniego tempa przyrostu siły w stojakach podczas rozpierania sekcji przedstawiono na rys. 5.9. W etykietach na wykresie podano wartość maksymalną siły w stojakach i wartości siły w stojakach oraz czasu w chwili początkowej i końcowej przedziału narastania siły w stojakach od wartości ($F_{st,p}$ + δ) do wartości (F_m - δ), gdzie:

$$\delta = 0{,}1 \cdot (F_m - F_{st,p}) \tag{5.8}$$

Czas narastania siły w stojakach wyznaczono zgodnie z normą PN-88/M-42000 [133].



Rys. 5.9. Wyznaczanie średniego tempa zmiany siły w stojakach w trakcie rozpierania sekcji

Fig. 5.9. Determining of the average rate of variation of force in legs during setting of a support unit

W przypadku przebiegu czasowego pokazanego na rys. 5.9 otrzymano:

$$w_{F,n,r} = 0{,}230 \ \mathrm{MN \cdot s^{-1}}$$

Tempo rozpierania stojaków zależy w dużym stopniu od ciśnienia i natężenia przepływu emulsji olejowo-wodnej w magistrali zasilającej, średnicy cylindra stojaka oraz oporów przepływu w układzie podpornościowym sekcji.

W tabeli 5.6 zestawiono maksymalne wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach zarejestrowane podczas ich rozpierania w poszczególnych miejscach wykonywania pomiarów dołowych.

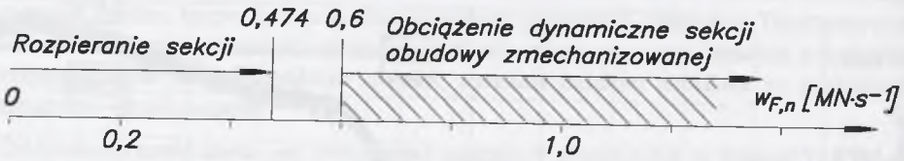
Tabela 5.6

Zestawienie maksymalnych wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach podczas rozpierania sekcji

Ściana	Pokład	$w_{F,n,r,max}$ [MN·s^{-1}]
N791	502	0,474
IV	501	0,481
8	414/4	0,478
758	510	0,256

Uwzględniając wartości $w_{F,n,r,max}$ zestawione w tabeli 5.6 przyjęto, że we wszystkich wyrobiskach ścianowych, w których wykonywano pomiary, obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej charakteryzuje średnie tempo przyrostu siły w stojakach o wartości większej od 0,6 $MN \cdot s^{-1}$.

Zakresy wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach charakteryzujące działanie układu hydraulicznego sekcji oraz obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej przedstawiono na rys. 5.10.



Rys. 5.10. Zakresy zmian średniego tempa przyrostu siły w stojakach charakteryzujące rozpieranie sekcji oraz obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej

Fig. 5.10. Ranges of the average rate of force increase in legs which are characteristic for setting of a support unit and for dynamic load acting on a powered roof support unit

Określenie wartości minimalnej średniego tempa przyrostu siły w stojakach jest przydatne szczególnie przy analizie przebiegów czasowych siły w stojakach charakteryzujących się wartościami mniejszymi od wartości siły, odpowiadającej nominalnemu ciśnieniu wstępnemu w stojakach. Umożliwia bowiem odróżnienie przebiegów czasowych siły w stojakach, spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji od przebiegów czasowych siły w stojakach wywołanych, np.: dodatkowym rozpieraniem stojaka.

Istotnym czynnikiem wpływającym na liczbę zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji są zakłócenia sygnału pomiarowego. Uwzględniając dołowe warunki wykonywania pomiarów przyjęto za [32], że dalszej analizie można poddać te przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych, dla których współczynnik sygnał/szum jest większy od 5,0. Oznacza to, że zakłócenia sygnału pomiarowego nie mogą być większe niż 20% maksymalnego zarejestrowanego przyrostu sygnału.

Do dalszej analizy zakwalifikowano 37 przebiegów czasowych zmian siły w stojakach oraz 27 zarejestrowanych równocześnie przebiegów czasowych sygnału przyspieszenia stropnicy. Niestety, w przypadku 10 sygnałów przyspieszenia współczynnik sygnał/szum był mniejszy od 5,0 i dlatego w dalszej części pracy nie będą one rozpatrywane. Przyczyny większego wpływu zakłóceń na przebieg przyspieszenia należy upatrywać w znacznie większym oporze wewnętrznym czujnika przyspieszenia (rzędu GΩ) w porównaniu z oporem wewnętrznym czujnika siły (około 100 Ω). Duży opór wewnętrzny czujnika przyspieszenia ułatwia indukowanie się zakłóceń w układzie pomiarowym przyspieszenia stropnicy [26].

Przebiegi czasowe będące przedmiotem ostatecznego opracowania wyników pomiarów zarejestrowano podczas pięciu etapów badań. Niestety, żaden fragment przebiegu czasowego sygnału pomiarowego, zarejestrowany podczas VI etapu badań, nie spełnia wymagań odnośnie do dopuszczalnego poziomu zakłóceń oraz tempa przyrostu siły w stojakach. Karty informacyjne zawierające dane opisujące warunki, w jakich zarejestrowano przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych zakwalifikowane do dalszej analizy, zamieszczono w sprawozdaniach z pomiarów dołowych [99, 100, 102, 103, 104].

Spośród zjawisk dynamicznych, występujących w górotworze w trakcie badań, najwięcej odnotowano wstrząsów górotworu. Poniżej przedstawiono informacje dotyczące wstrząsów górotworu zlokalizowanych w otoczeniu miejsca wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

Dane dotyczące omawianych wstrząsów udostępnione przez pracowników kopalnianych stacji tąpań obejmują:
- czas wystąpienia wstrząsu,
- energię wstrząsu,
- współrzędne poziome ogniska.

Rejestrowano wstrząsy o energii większej od $1 \cdot 10^2$ J (w KWK „Zabrze-Bielszowice" powyżej $1 \cdot 10^3$ J). Ze względu na niewielką dokładność, spowodowaną małą liczbą zainstalowanych sejsmometrów, nie określano współrzędnej pionowej ogniska wstrząsu. W przypadku małej energii wstrząsu (mniejszej od $1 \cdot 10^3$ J; w KWK „Zabrze-Bielszowice" – $1 \cdot 10^4$ J) współrzędne poziome ogniska również nie były wyznaczane.

W ścianie N791 w KWK „Zabrze-Bielszowice" aktywność górotworu, mierzona liczbą zarejestrowanych wstrząsów, była bardzo wysoka. Dużą liczbę wstrząsów, lecz o stosunkowo niskiej energii, odnotowano również w trakcie badań w ścianie 758 KWK „Porąbka-Klimontów". Znacznie mniejszą liczbę wstrząsów odnotowano natomiast w trakcie IV i V etapu pomiarów wykonywanych w ścianie IV KWK „Wujek" i ścianie 8 KWK „Śląsk". Dane dotyczące liczby wstrząsów zarejestrowanych przez stacje tąpań podczas poszczególnych serii pomiarów zestawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7

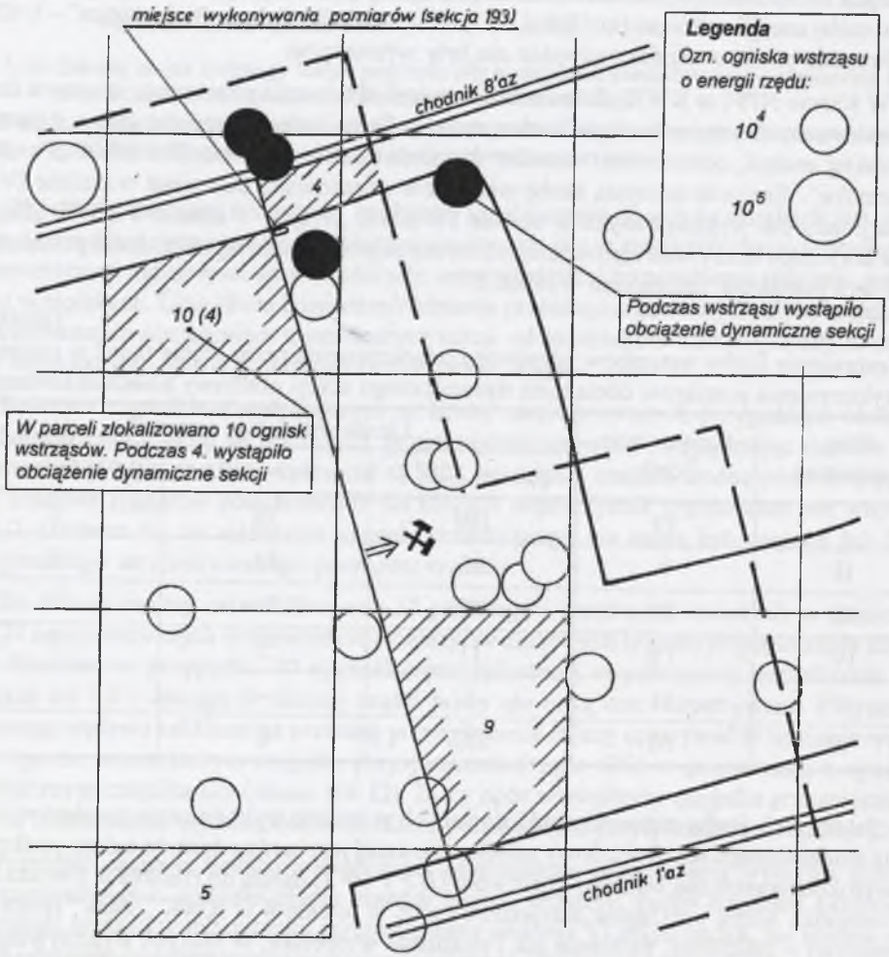
Zestawienie liczby wstrząsów górotworu odnotowanych przez stację tąpań w rejonie wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Etap pomiarów	Czas trwania [dni]	Liczba wstrząsów o energii:		
		poniżej $1 \cdot 10^4$ J	$1 \div 9 \cdot 10^4$ J	$1 \cdot 10^5$ J i wyższe
I	19	109	39	3
II	9	88	23	1
III	20	105	60	3
IV	15	11	5	3
V	11	1	-	-
VI	10	283	6	-

Jakkolwiek liczba wstrząsów odnotowanych w rejonie wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej jest bardzo duża, to należy podkreślić, że wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu ($E > 1 \cdot 10^5$ J) należą do rzadkości. Zwraca uwagę niewielka liczba wstrząsów zarejestrowanych w ścianie 8 w KWK „Śląsk" (piąty etap pomiarów) – zaliczonej, podobnie jak i pozostałe wyrobiska, w których wykonywano pomiary, do trzeciego stopnia zagrożenia tąpaniami W trakcie wykonywania pomiarów kopalniana stacja tąpań odnotowała tylko jeden wstrząs o energii $1 \cdot 10^3$ J, którego ognisko zlokalizowano na wybiegu ściany w odległości ok. 80 m od miejsca wykonywania pomiarów. Nie spowodował on zmian obciążenia badanej sekcji. Na podkreślenie zasługuje również

to, że żadne spośród strzelań przeprowadzonych podczas pomiarów w ścianie 8 nie sprowokowało wstrząsu górotworu o energii większej niż 10^2 J. Lokalizację ognisk wstrząsów odnotowanych podczas pierwszego etapu pomiarów przedstawiono na rys. 5.11.

Wstrząsy górotworu odnotowane w trakcie pomiarów były bardzo słabo odczuwalne w ścianie. Niektóre spośród nich spowodowały jedynie lokalne wysypywanie się węgla z czoła ściany na przenośnik. Stwierdzenie powyższe dotyczy również wstrząsu o energii $1 \cdot 10^6$ J, którego ognisko zlokalizowano w zawale około 40 m od miejsca pomiarów. Nie zanotowano również żadnych uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej. Umiejętnej eksploatacji ścian, prowadzonej zgodnie z zasadami profilaktyki tąpaniowej, zawdzięczać trzeba również i to, że w trakcie wykonywania pomiarów nie doszło w badanych ścianach do tąpnięcia.



Rys. 5.11. Lokalizacja ognisk wstrząsów o energii większej niż $9 \cdot 10^3$ J odnotowanych w trakcie I etapu pomiarów – ściana N791 pokład 502

Fig. 5.11. Location of focuses of bumps characterized by the energy higher than $9 \cdot 10^3$ J and recorded during the 1st stage of measurements carried out on the longwall face N791 in the seam 502

Odnotować trzeba jedynie jedno tąpnięcie, które miało miejsce w ścianie N791 KWK „Zabrze-Bielszowice" tuż po zakończeniu pierwszej serii pomiarów. Według [136] tąpnięcie spowodował wstrząs górotworu o energii $4 \cdot 10^6$ J. Ognisko wstrząsu zlokalizowano w zawale, 10 m za frontem ściany około 5 m poniżej chodnika 8'az. Wstrząs był bardzo silnie odczuwalny na powierzchni. Spowodował również skutki w ścianie. Przejawiły się one wysypaniem węgla z czoła ściany, lokalnym wypiętrzeniem spągu („podbiciem przenośnika") o około 20 cm oraz uszkodzeniem sześciu podpór stropnicy w sekcjach usytuowanych w pobliżu chodnika 1'az.

Opisane tąpnięcie świadczy o trafnym wyborze miejsca badań. Równocześnie z porównania usytuowania ogniska wstrząsu i lokalizacji sekcji z uszkodzonymi podporami stropnicy wynika, że prawdopodobieństwo wykonania pomiarów w trakcie działania obciążenia dynamicznego powodującego uszkodzenie elementu sekcji jest znikome.

Realizacja trzech etapów pomiarów w ścianie N791 umożliwiła prześledzenie zmieniającej się lokalizacji wstrząsów górotworu wraz z postępem ściany. W porównaniu z pierwszym etapem badań (rys. 5.11), kiedy ogniska wstrząsów zlokalizowane były głównie w otoczeniu czoła ściany i odcinka krawędzi eksploatacji w pokładzie 501, równoległego do chodnika 8'az, w kolejnych etapach, gdy czoło ściany znajdowało się w strefie wpływu krawędzi eksploatacji w pokładach 501 i 416, ogniska wstrząsów położone były przede wszystkim w dolnym i środkowym odcinku ściany, w otoczeniu krawędzi eksploatacji (rys. 5.12).

Lokalizację ognisk wstrząsów odnotowanych w ścianie IV w pokładzie 501 w KWK „Wujek" przedstawiono na rys. 5.13.

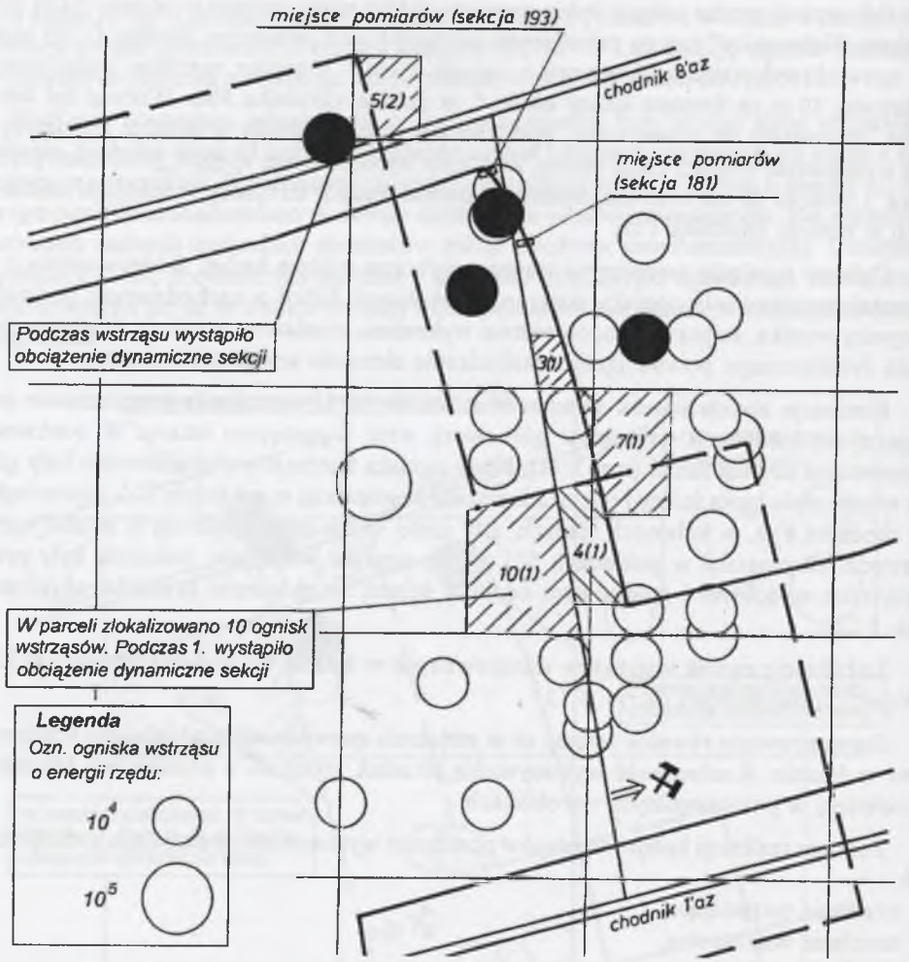
Zarejestrowano również zmiany sił w stojakach spowodowane strzelaniem wykonywanym w ścianie. Konieczność wykonywania strzelań wynikała z profilaktyki tąpaniowej stosowanej w poszczególnych wyrobiskach.

Podczas realizacji kolejnych etapów pomiarów wykonywano następujące rodzaje strzelań:
- strzelania torpedujące,
- strzelania wstrząsowe,
- strzelania urabiające.

Najwięcej strzelań wykonano podczas II i III etapu pomiarów. Schemat rozmieszczenia otworów strzałowych podczas jednego spośród strzelań torpedujących, podczas którego zarejestrowano obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, przedstawiono na rys. 5.14.

Na rys. 5.14 podano numery sekcji, w rejonie których rozmieszczono otwory, jak również zaznaczono miejsce wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej (sekcja nr 193). Należy zaznaczyć, że na ogólną liczbę 9 strzelań torpedujących wykonanych w ścianie N791 jedynie w 5 przypadkach odnotowano obciążenie dynamiczne sekcji. W pozostałych przypadkach obserwowane zmiany siły w stojakach nie przekraczały poziomu szumów sygnału pomiarowego.

W trakcie pomiarów wykonano również cztery strzelania wstrząsowe. Zazwyczaj wiercono w czole ściany do 40 otworów o długości 8 m. Odległość od najbliższego otworu do badanej sekcji wynosiła 10,5 m. Podczas tych czterech strzelań nie zarejestrowano obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Niewielka liczba przeprowadzonych

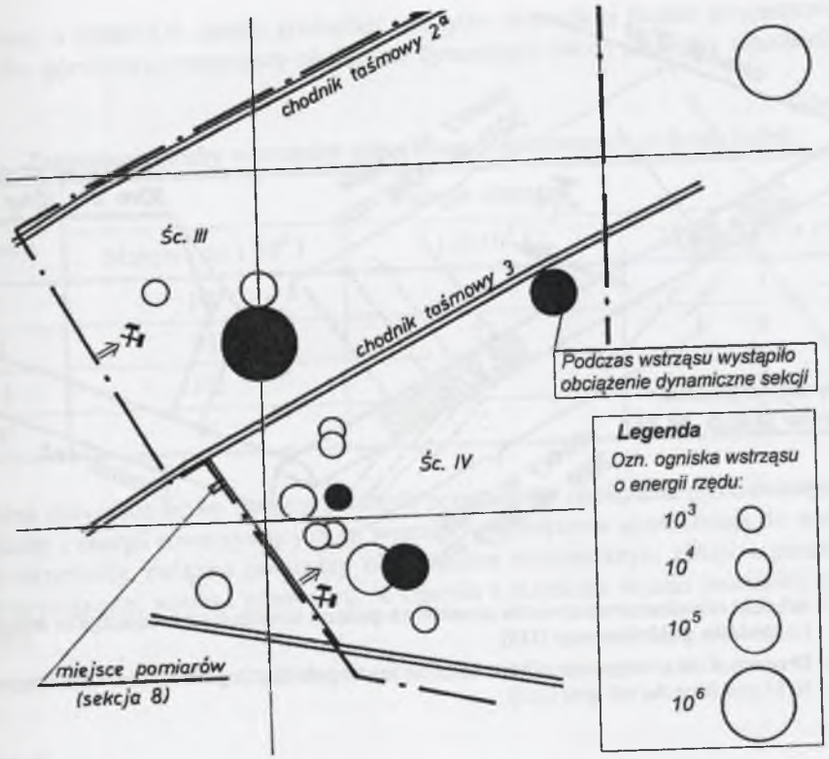


Rys. 5.12. Lokalizacja ognisk wstrząsów o energii większej niż $9 \cdot 10^3$ J odnotowanych w trakcie III etapu pomiarów – ściana N791 pokład 502

Fig. 5.12. Location of focuses of bumps characterized by the energy higher than $9 \cdot 10^3$ J and recorded during the 3rd stage of measurements carried out on the longwall face N791 in the seam 502

strzelań wstrząsowych powoduje, że nie można stwierdzić, czy istotnie wpływ tych strzelań na obciążenia dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej jest tak nieznaczny. Należy zaznaczyć, że tylko jedno, spośród 4 strzelań wstrząsowych wykonywanych podczas IV etapu pomiarów (ściana IV, pokład 501, KWK „Wujek") spowodowało wystąpienie obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

W trakcie III etapu badań (ściana N791, pokład 502 KWK „Zabrze-Bielszowice") siedmiokrotnie wykonywano strzelania urabiające. Ładunki materiału wybuchowego o łącznej masie 30 – 40 kg umieszczono w 120 ÷ 140 otworach o długości około 1,5 m i odpalono w kilku seriach po ok. 20 ładunków w każdej. Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej zarejestrowano podczas trzech strzelań urabiających, kiedy odpalono ładunki wybuchowe umieszczone najbliżej badanej sekcji.



Rys. 5.13. Lokalizacja ognisk wstrząsów o energii większej niż $9 \cdot 10^2$ J odnotowanych w trakcie IV etapu pomiarów – ściana IV, pokład 501

Fig. 5.13. Location of focuses of bumps characterized by the energy higher than $9 \cdot 10^2$ J and recorded during the 4th stage of measurements carried out on the longwall face IV in the 501 seam

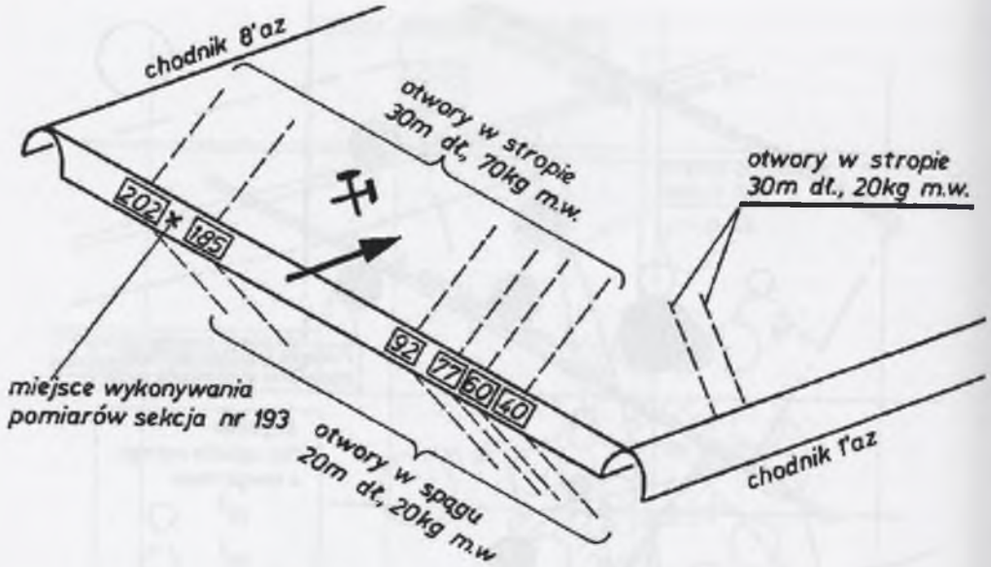
Korzystając z danych zebranych w kopalnianej stacji tąpań, wyróżniono cztery przypadki występowania obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej:

1. podczas samoistnego wstrząsu górotworu,
2. w trakcie strzelania wywołującego wstrząs górotworu,
3. w trakcie strzelania, przy czym stacja tąpań nie odnotowała wstrząsu górotworu,[1]
4. wymuszenie obciążenia dynamicznego nie zostało zidentyfikowane.[1]

W tabeli 5.8 zestawiono informacje dotyczące liczby zarejestrowanych obciążeń dynamicznych sekcji według towarzyszącym im rodzajów zjawisk dynamicznych w górotworze. Sformułowanie „samoistne" użyte w kolumnie „zjawisko" (tabela 5.8) oznacza samoistny wstrząs górotworu.

Z tabeli 5.8 wynika, że najczęściej obciążenie dynamiczne sekcji rejestrowano w tym samym czasie co samoistne wstrząsy górotworu o energii rzędu 10^4 J. Porównując jednak liczbę wstrząsów towarzyszących przypadkom obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej z ogólną liczbą wstrząsów zarejestrowanych podczas trwania pomiarów,

[1] Ściślej: energia wstrząsu górotworu była mniejsza niż 100 J i nie została zarejestrowana przez sejsmometry.



Rys. 5.14. Schemat rozmieszczenia otworów strzałowych podczas strzelania torpedującego ze ściany N791 i z chodnika podścianowego [115]

Fig. 5.14. Diagram of the arrangement of blast holes during torpedo blasting effected from the longwall face N791 and from the tail gate [115]

Tabela 5.8

Zestawienie informacji o typach zjawisk towarzyszących zmierzonym obciążeniom dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej

Etap pom.	Liczba obciążeń dyn. sekcji	Zjawisko	Liczba wstrząsów o energii				
			$<1\cdot10^2$ J	$1\div9\cdot10^2$ J	$1\div9\cdot10^3$ J	$1\div9\cdot10^4$ J	$>1\div9\cdot10^5$ J
I	11	Samoistne	2	-	1	6	1
		Strzelanie	-	-	-	1	-
II	6	Samoistne	1	-	-	4	-
		Strzelanie	-	-	-	1	-
III	14	Samoistne	2	-	-	6	-
		Strzelanie	-	-	1	4	1
IV	5	Samoistne	1	1	-	2	-
		Strzelanie	-	-	1	-	-
V	1	Samoistne	-	-	-	-	-
		Strzelanie	1	-	-	-	-
	Ogółem	Samoistne	6	1	1	18	1
		Strzelanie	1	-	2	6	1

zestawioną w tabeli 5.9, należy stwierdzić, że tylko niewielkiej liczbie zarejestrowanych wstrząsów górotworu towarzyszy obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej.

Tabela 5.9

Zestawienie liczby wstrząsów górotworu odnotowanych podczas badań

Etap pomiaru	Energia wstrząsu		
	Mniejsza od $1\cdot10^4$ J	$1\div9\cdot10^4$ J	Większa od $9\cdot10^4$ J
I	107	39	3
II	91	23	0
III	103	60	3
IV	11	5	0

Dane dotyczące liczby zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji oraz liczby i energii towarzyszących im wstrząsów górotworu upoważniają do stwierdzenia, iż określenie związku pomiędzy obciążeniem dynamicznym sekcji a parametrami charakteryzującymi wstrząs górotworu, w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów, jest niemożliwe.

6. DYNAMICZNE ODDZIAŁYWANIE GÓROTWORU NA SEKCJĘ OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ W ŚWIETLE WYNIKÓW BADAŃ PROWADZONYCH W WYROBISKACH ŚCIANOWYCH

W wyniku pomiarów opisanych w rozdziale 5 niniejszej pracy zarejestrowano odpowiedź układu mechanicznego, jakim jest sekcja obudowy zmechanizowanej, na wymuszenie w postaci dynamicznego oddziaływania górotworu. Na odpowiedź układu – przebiegi czasowe: siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy – mają wpływ zarówno właściwości układu mechanicznego, jak również dynamiczne oddziaływanie górotworu. W związku z tym, przy ustalonych właściwościach mechanicznych sekcji, takich jak np.: współczynnik sprężystości stojaków, można zarejestrowane przebiegi czasowe potraktować jako jakościowe charakterystyki dynamicznego oddziaływania górotworu na badaną sekcję obudowy zmechanizowanej.

W tym sensie parametry charakteryzujące zmianę siły w stojakach można również potraktować jako miarę dynamicznego oddziaływania górotworu. Przebiegi czasowe siły w stojakach można również wykorzystać do oszacowania energii sprężystej przejętej przez stojaki, przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w ruchu względnym stropnicy i spągnicy spowodowanym dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję. Z kolei analiza zarejestrowanych sygnałów pomiarowych w dziedzinie częstości umożliwia wyznaczenie wielkości niezbędnych do identyfikacji gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej oraz wariancji obciążenia dynamicznego sekcji.

Wyżej wymienione aspekty charakterystyki obciążenia dynamicznego sekcji na podstawie analizy przebiegów czasowych siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy przedstawiono poniżej.

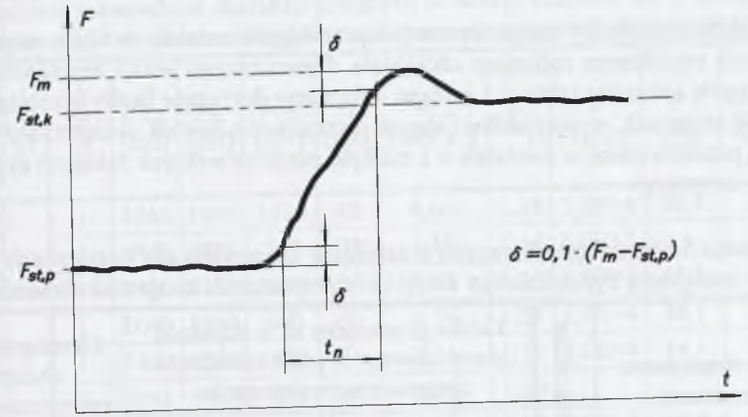
6.1. Parametry charakteryzujące wypadkową siłę w stojakach

Przedmiotem rozważań przedstawionych w niniejszym rozdziale są następujące wielkości fizyczne:

- parametry charakteryzujące obciążenie statyczne sekcji obudowy zmechanizowanej:
  - $F_{st,p}$ – początkowa statyczna siła w stojakach,
  - $F_{st,k}$ – końcowa statyczna siła w stojakach,
- parametry charakteryzujące zmianę siły w stojakach spowodowaną obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej:
  - F_m – maksymalna wartość siły w stojakach w trakcie rozpatrywanego przebiegu czasowego obciążenia sekcji,
  - t_n – czas narastania obciążenia, wyznaczany zgodnie z PN-88/M-42000,
  - K_d – współczynnik przyrostu obciążenia, definiowany jako iloraz sił F_m i $F_{st,p}$,
  - $w_{F,n}$ – średnie tempo przyrostu siły w stojakach wyznaczone ze wzoru (1.1).

Związki pomiędzy wybranymi parametrami charakteryzującymi przebieg czasowy siły w stojakach, spowodowany obciążeniem dynamicznym sekcji, ilustruje rys. 6.1.

Rozpatrywano również parametry charakteryzujące wstrząsy górotworu, określane przez kopalniane stacje tąpań:



Rys. 6.1. Poglądowa ilustracja wybranych parametrów charakteryzujących przebieg czasowy siły w stojakach sekcji obudowy zmechanizowanej

Fig. 6.1. Visual presentation of selected parameters which characterize the time related course of force in legs of a powered roof support unit

- r – odległość ogniska wstrząsu od miejsca przeprowadzania pomiarów obciążenia sekcji,
- E – energia wstrząsu,
- $\varepsilon_{r,p}$ – gęstość energii sejsmicznej fali podłużnej w miejscu pomiarów obciążenia sekcji,
- $\varepsilon_{r,s}$ – gęstość energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiarów obciążenia sekcji.

Gęstość energii sejsmicznej w miejscu pomiarów określono korzystając z zależności podanych przez Dubińskiego i Wierzchowską [23]

$$\varepsilon_{r,s} = \frac{E}{4\pi R^2 \left(\frac{r}{R}\right)^{2n_a} e^{2\alpha_a (r-R)}} \tag{6.1}$$

gdzie:

- R – promień kuli odniesienia; $R = 500$ m,
- r – odległość ogniska wstrząsu od miejsca przeprowadzania pomiarów obciążenia sekcji; [m],
- n_a – wykładnik funkcji rozchodzenia się fali sejsmicznej:
  dla fali poprzecznej $n_a = 1{,}067$;
  dla fali podłużnej $n_a = 1{,}083$;
- α_a – współczynnik pochłaniania amplitudy fali sejsmicznej:
  dla fali poprzecznej $\alpha_a = 0{,}0165$ km^{-1},
  dla fali podłużnej $\alpha_a = 0{,}0189$ km^{-1} [23].

Przystępując do analizy wyników pomiarów dołowych, w pierwszej kolejności uwzględniono rodzaj obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, a tym samym zwrot wektora tego obciążenia.

6.1.1. Rodzaj obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Dane dotyczące liczby zarejestrowanych przebiegów czasowych siły w stojakach spowodowanych określonym rodzajem obciążenia dynamicznego sekcji zestawiono w tabeli 6.1. W ostatniej kolumnie tabeli 6.1 podano informacje dotyczące liczby przebiegów czasowych siły w stojakach, w przypadku których wyznaczenie zwrotu obciążenia dynamicznego metodą przedstawioną w rozdziale 4.1 nie było możliwe wskutek zakłóceń sygnału przyspieszenia stropnicy.

Tabela 6.1

Zestawienie liczby zarejestrowanych przebiegów czasowych siły w stojakach według zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji i towarzyszących im zjawisk dynamicznych

Zjawisko dynamiczne w górotworze	Oznaczenie	Liczba przebiegów sił w stojakach spowodowanych przez obciążenie dynamiczne przyłożone do:		Określenie zwrotu obciążenia zewnętrznego sekcji nie było możliwe
		stropnicy	spągnicy	
Samoistny wstrząs górotworu	1	10	7	4
Wstrząs górotworu sprowokowany przez strzelanie	2	6	-	3
Energia wstrząsu samoistnego mniejsza niż 10^2 J	3	1	2	3
Energia wstrząsu sprowokowanego strzelaniem — do 10^2 J	4	1	-	-
Razem		18	9	10

W tabeli 6.2 zestawiono parametry charakteryzujące przebiegi czasowe siły w stojakach, spowodowane obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od stropu. Informacje na temat zjawisk dynamicznych występujących w górotworze podczas zarejestrowanych zmian siły w stojakach oznaczano w tabelach 6.2, 6.3 i 6.4 tak samo, jak w tabeli 6.1. Stosowano również następujące oznaczenia lokalizacji ognisk wstrząsów towarzyszących poszczególnym przebiegom czasowym siły w stojakach:

w – ognisko wstrząsu w caliźnie węglowej,
s – ognisko wstrząsu w odległości do 20 m od czoła ściany,
z – ognisko wstrząsu w zawale.

W tabeli 6.3 zestawiono parametry charakteryzujące przebiegi czasowe siły w stojakach spowodowane działaniem obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji.

W trakcie pomiarów dołowych zarejestrowano tylko 9 obciążeń stojaków spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym na spągnice. Cztery spośród nich zarejestrowano w ścianie IV prowadzonej po spągu węglowym w przystropowej warstwie pokładu 501 KWK „Wujek" (IV etap pomiarów). Na podkreślenie zasługuje fakt, iż tylko w jednej serii pomiarowej zarejestrowanej w KWK „Wujek" odnotowano wartość początkowego przyspieszenia stropnicy – $a_o > 0$, a więc obciążenie dynamiczne sekcji działające od stropu.

Tabela 6.2

Zestawienie parametrów charakteryzujących przebiegi czasowe siły w stojakach, spowodowane działaniem obciążenia dynamicznego na stropnicę sekcji

Lp.	Seria pomiarowa	Etap	Zjawisko	$F_{st,p}$ [kN]	F_m [kN]	$F_{st,k}$ [kN]	t_n [ms]	$w_{F,n}$ [MN·s^{-1}]	K_d	E [J]	r [m]	Lok. ogn.	$\varepsilon_{r,s}$ [J·m^{-2}]
1	1/Z	I	1	1040	1440	1430	40	8,00	1,38	3,0E+4	36,4	z	2,599
2	2/Z		1	700	800	760	73	1,10	1,14	8,0E+3			
3	5/Z		1	2580	3180	3090	90	5,33	1,23	3,0E+4	45,3	z	1,631
4	8/Z		1	1040	1300	660	50	4,16	1,25	6,0E+4	38,1	z	4,721
5	9/Z		1	1420	1560	1490	74	1,51	1,10	4,0E+4	14,1	z	26,078
6	10/Z		3	860	940	900	84	0,76	1,09				
7	11/Z		1	680	780	730	74	1,08	1,15	8,0E+4	24,4	s	16,262
8	14/Z		1	1200	1410	1380	34	4,94	1,18	1,0E+4	18,0	z	3,883
9	15/Z		2	800	880	840	33	1,94	1,10	2,0E+4	61,8	w	0,559
10	22/Z	II	1	650	870	870	126	1,40	1,34	3,0E+4	65,2	s	0,749
11	25/Z		2	650	740	710	35	2,06	1,14	4,0E+4	107,0	w	0,346
12	28/Z	III	2	1570	1900	620	69	3,83	1,21	2,0E+4	96,6	w	0,216
13	31/Z		2	1290	1390	1340	69	1,16	1,08	2,0E+3			
14	34/Z		2	2350	2540	2510	14	10,86	1,08	7,0E+4	141,2	w	0,335
15	35/Z		1	1260	1640	1510	130	2,34	1,30	3,0E+4	50,0	z	1,320
16	39/Z		1	740	840	810	36	2,22	1,14	3,0E+4	92,2	z	0,357
17	6/W	IV	2	1820	1970	1970	15	8,00	1,08	1,0E+3	64,8	w	0,025
18	2/S	V	4	720	790	780	79	0,71	1,10				

Tabela 6.3

Zestawienie parametrów charakteryzujących przebiegi czasowe siły w stojakach spowodowane działaniem obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji

Lp.	Seria pomiarowa	Etap	Zjawisko	$F_{st,p}$ [kN]	F_m [kN]	$F_{st,k}$ [kN]	t_n [ms]	$w_{F,n}$ [MN·s^{-1}]	K_d	E [J]	r [m]	Lok. ogn.	$\varepsilon_{r,s}$ [J·m^{-2}]
1	3/Z	I	3	690	1240	1150	99	4,44	1,80				
2	17/Z	II	1	1350	1670	1120	20	12,80	1,24	4,0E+4	29	w	5,566
3	27/Z	III	1	830	990	940	49	2,61	1,19	2,0E+4	25	s	3,864
4	33/Z		1	1070	1460	1070	45	6,93	1,36	5,0E+4	46	z	2,616
5	40/Z		1	400	480	450	28	2,29	1,20	2,0E+4	89	z	0,254
6	3/W	IV	1	1213	2224	1624	12	67,40	1,83	2,0E+4	104	w	0,182
7	4/W		3	2261	3112	2478	23	29,60	1,38				
8	5/W		1	1538	2529	2282	15	52,85	1,64	1,5E+4	239	w	0,023
9	7/W		1	1010	1240	1070	12	15,33	1,23	5,0E+2			

Pozostałe przypadki dynamicznego oddziaływania górotworu na spągnice sekcji zarejestrowano w ścianach prowadzonych po spągu łupkowym. Na ogólną liczbę 32 przebiegów siły w stojakach, zarejestrowanych w tych ścianach, w pięciu przypadkach wystąpiło $a_o < 0$. W ścianach prowadzonych po łupku przypadki działania obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji występują więc znacznie rzadziej niż w ścianach prowadzonych po spągu węglowym, w przystropowej warstwie pokładu.

W przypadku 10 serii pomiarowych wyznaczenie zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji, metodą przedstawioną w rozdziale 4.1, nie było możliwe ze względu na nadmierne zakłócenia sygnału przyspieszenia. Parametry charakteryzujące przebiegi czasowe siły w stojakach zarejestrowane w tych seriach pomiarowych zestawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.4

Zestawienie parametrów charakteryzujących przebiegi czasowe sił w stojakach, zarejestrowane w przypadkach, kiedy nie wyznaczono zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Lp.	Seria pomiarowa	Etap	Zjawisko	$F_{st,p}$ [kN]	F_m [kN]	$F_{st,k}$ [kN]	t_n [ms]	$w_{F,n}$ [MN·s^{-1}]	K_d	E [J]	r [m]	Lok. ogn.	$\varepsilon_{r,s}$ [J·m^{-2}]
1	4/Z	I	1	1630	1770	1720	158	0,71	1,09	1,0E+6	18,0	s	388,3
2	20/Z	II	3	1620	1810	1780	34	4,47	1,12				
3	23/Z		1	630	720	680	93	0,77	1,14	1,0E+4	87,5	w	0,133
4	24/Z		1	650	820	725	35	3,89	1,26	1,0E+4	45,3	w	0,544
5	26/Z	III	2	1430	1660	1590	145	1,27	1,16	4,0E+4	102,6	w	0,379
6	29/Z		3	1070	1320	1320	224	0,89	1,23				
7	30/Z		2	1140	1210	1200	79	0,71	1,06	1,0E+4	154,0	w	0,040
8	36/Z		1	1690	2070	1850	26	11,69	1,22	5,0E+4	44,7	z	2,791
9	37/Z		2	740	860	780	56	1,71	1,16	1,0E+5	111,8	w	0,788
10	38/Z		3	430	520	510	23	3,13	1,21				

Wszystkie przebiegi czasowe siły, dla których nie wyznaczono zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji, zostały zarejestrowane w ścianie N791 prowadzonej w pokładzie 502 w KWK „Zabrze-Bielszowice". Parametry tych przebiegów czasowych siły w stojakach, zestawione w tabeli 6.4, mają wartości porównywalne z wartościami parametrów charakteryzujących przebiegi czasowe sił w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od stropu. W tabeli 6.5 porównano granice przedziałów zmienności oraz wartości średnie parametrów charakteryzujących trzy grupy przebiegów czasowych siły w stojakach wyróżnione w tabeli 6.1.

Analizując informacje dotyczące serii pomiarowych, dla których (wskutek zakłóceń sygnału przyspieszenia) nie wyznaczono zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji, z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że:

- w przypadku trzech serii pomiarowych zarejestrowanych podczas strzelań torpedujących obciążenie dynamiczne działało na sekcję od stropu, gdyż ładunek materiału wybuchowego odpalano w stropie,

- w przypadku pozostałych siedmiu serii pomiarowych obciążenie zewnętrzne również działało na sekcję od strony stropu, gdyż:
  - jako przyczynę tąpnięć odnotowanych w ścianie N791 wskazywano wstrząsy zlokalizowane w rejonie krawędzi eksploatacji w pokładach 501 i 416, a więc w stropie pokładu 502,
  - ogniska wszystkich wstrząsów górotworu, odnotowanych w rejonie ściany N791 kopalniana stacja tąpań lokalizowała w pokładzie 502.

Ostatecznie, biorąc pod uwagę parametry zamieszczone w tabeli 6.5 oraz wyżej wymienione przesłanki, przyjęto, że również te przebiegi czasowe sił w stojakach, dla których nie wyznaczono zwrotu początkowego przyspieszenia stropnicy, zostały spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu na stropnicę sekcji.

Tak więc ostatecznie metoda określenia zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji przedstawiona w rozdziale 4.1 oraz analiza informacji uzyskanych w kopalnianej stacji tąpań umożliwiła wyróżnienie 28 serii pomiarowych zarejestrowanych podczas obciążenia dynamicznego sekcji, działającego od strony stropu oraz 9 serii pomiarowych, zawierających przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych zarejestrowane podczas obciążenia dynamicznego sekcji od strony spągu.

Tabela 6.5

Zestawienie wartości granic przedziałów zmienności oraz wartości średnich parametrów charakteryzujących grupy przebiegów czasowych sił w stojakach wyróżnione w tabeli 6.1

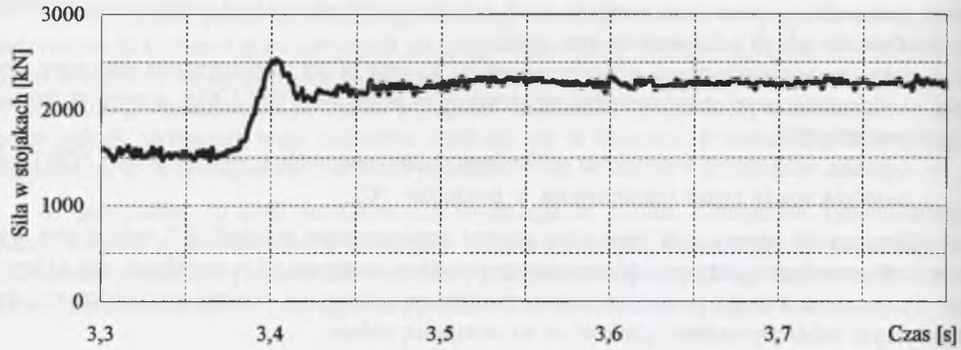
Zwrot obc. dynamicznego	Od stropu			Nieoznaczone			Od spągu		
Wartość parametru	Min.	Średnia	Max.	Min.	Średnia	Max.	Min.	Średnia	Max.
$F_{st,p}$ [kN]	650	1177	2580	430	1125	1690	400	1151	2261
F_m [kN]	740	1388	3180	520	1259	2070	480	1661	3112
$F_{st,k}$ [kN]	620	1228	3090	510	1146	2070	450	1354	2478
t_n [ms]	14	64	130	23	87	224	12	33	99
$w_{F,n}$ [MN·s^{-1}]	0,76	3,29	10,86	0,71	2,92	11,69	2,29	21,58	67,40
K_d	1,08	1,18	1,38	1,06	1,17	1,26	1,19	1,43	1,83

6.1.2. Typ przebiegu czasowego siły w stojakach

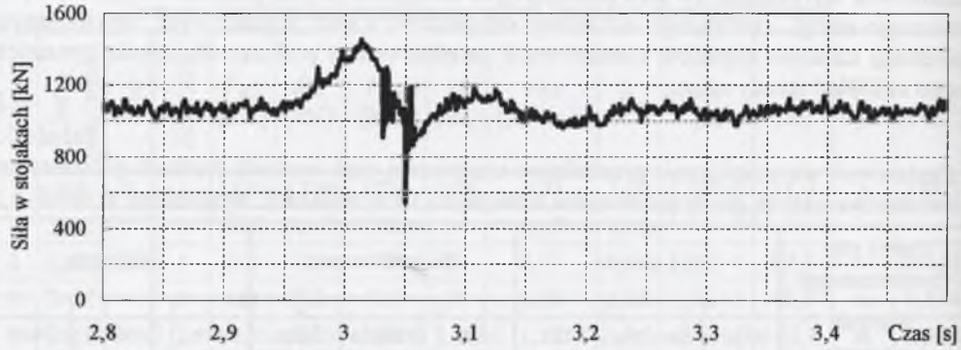
Zarejestrowane przebiegi czasowe siły w stojakach można podzielić na trzy typy, przyjmując za kryterium podziału charakter zmian mierzonej siły w funkcji czasu. Najczęściej występują przebiegi czasowe typu I, charakteryzujące się zwiększonym końcowym obciążeniem statycznym stojaków $F_{st,k}$. Przykład przebiegu czasowego typu I przedstawiono na rys. 6.2.

Typ II zarejestrowanych zmian siły w stojakach charakteryzuje początkowe i końcowe obciążenie statyczne o zbliżonej wartości (rys. 6.3). Do przebiegów tego typu zaliczono wszystkie, dla których:

$$\left|F_{st,k} - F_{st,p}\right| \le 0{,}05\, F_{st,p} \tag{6.2}$$



Rys. 6.2. Typ I przebiegu czasowego siły w stojakach
Fig. 6.2. Type I of the time related course of force in legs



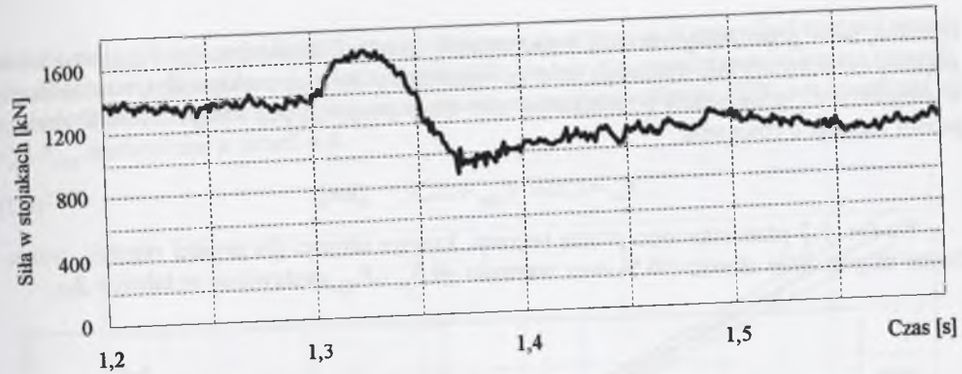
Rys. 6.3. Typ II przebiegu czasowego siły w stojakach
Fig. 6.3. Type II of the time related course of force in legs

Typ III przebiegu czasowego siły w stojakach obejmuje te przypadki, kiedy po początkowym wzroście siły następuje jej spadek i $F_{st,k} < F_{st,p}$, co ilustruje np. rys. 6.4. Dane dotyczące liczby zarejestrowanych typów przebiegów czasowych siły w stojakach oraz towarzyszących im zjawisk dynamicznych w górotworze zestawiono w tabeli 6.6.

Ponad 70% zarejestrowanych przebiegów czasowych siły w stojakach zalicza się do typu I. Dwudziestu spośród nich towarzyszyły wstrząsy górotworu o energii co najmniej równej $1 \cdot 10^4$ J. Pozostałe typy przebiegów czasowych siły w stojakach występują rzadziej.

Spośród przebiegów czasowych siły w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od spągu sześć należy do typu I, dwa (w tym przebieg czasowy pokazany na rys. 6.3) zaliczają się do typu II, natomiast jeden przebieg jest typu III (rys. 6.4). W grupie przebiegów czasowych spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu na stropnice sekcji 15 należy do I typu, 3 do II typu, a 2 są typu III. Udział przebiegów czasowych typu I jest więc w tej grupie przebiegów czasowych jeszcze większy niż w przypadku przebiegów czasowych spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji działającym na jej spągnice.

Zarejestrowane zmiany siły w stojakach są spowodowane przemieszczaniem się skał otaczających wyrobisko, skutkującym zmianą jego wysokości. W przypadku przebiegów



Rys. 6.4. Typ III przebiegu czasowego siły w stojakach
Fig. 6.4. Type III of the time related course of force in legs

Tabela 6.6

Zestawienie liczby zarejestrowanych typów przebiegów czasowych siły w stojakach według rodzaju zjawiska dynamicznego w górotworze i energii wstrząsu towarzyszącego obciążeniu dynamicznemu sekcji

Typ przebiegu czasowego	Zjawisko	Liczba serii pom.	Liczba wstrząsów o energii:				
			$<10^2$ J	$1–9 \cdot 10^2$ J	$1–9 \cdot 10^3$ J	$1–9 \cdot 10^4$ J	$\geq 1 \cdot 10^5$ J
I	Samoistne	21	5	-	1	15	-
	Strzelanie	8	1	-	2	4	1
II	Samoistne	4	1	1	-	1	1
	Strzelanie	1	-	-	-	1	-
III	Samoistne	2	-	-	-	2	-
	Strzelanie	1	-	-	-	1	-
Ogółem	Samoistne	27	6	1	1	18	1
	Strzelanie	10	1	-	2	6	1

typu II zmiany siły są spowodowane przede wszystkim drganiami stropu (lub spągu), natomiast w przypadku przebiegów czasowych typu I i III istotny wpływ na rejestrowane zmiany obciążenia ma przemieszczanie się skał, a nie ich drgania wokół położenia równowagi. Tak więc większość zarejestrowanych zmian wypadkowej siły w stojakach spowodowały zjawiska ujęte w tabeli 1.1 w rubryce „przemieszczenia stropu".

6.1.3. Maksymalna wartość siły w stojakach

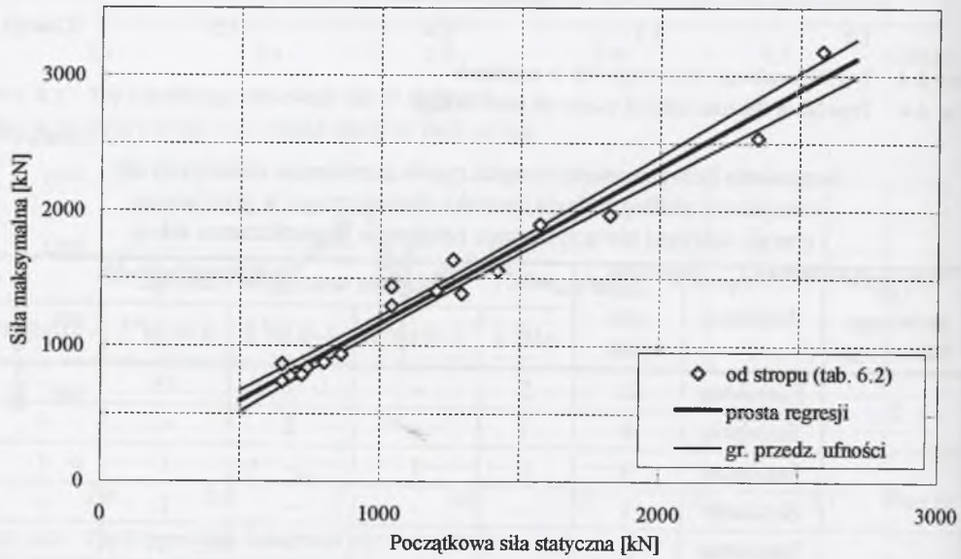
Analizując wartości siły w stojakach, charakteryzujące zarejestrowane przebiegi czasowe, stwierdzono istnienie zależności korelacyjnej pomiędzy maksymalną wartością siły w stojakach F_m a wartością początkowej siły statycznej $F_{st,p}$.

W przypadku 18-elementowej próby zawierającej wartości F_m i $F_{st,p}$ charakteryzujące zmiany siły w stojakach spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu współczynnik korelacji wynosi 0,985. Krytyczna wartość współczynnika korelacji dla 18 stopni swobody i poziomu ufności 90% wynosi 0,400. Przyjmując poziom ufności 90% wykazano

również, że w populacji generalnej współczynnik korelacji pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ jest istotnie większy od 0,965 [114]. Tak więc liniowa zależność pomiędzy maksymalną wartością siły w stojakach F_m a wartością początkowej siły statycznej $F_{st,p}$ jest bardzo silna. Opisuje ją prosta regresji o równaniu:

$$F_m = 1{,}150 \cdot F_{st,p} + 22{,}3\,; \quad [\mathrm{kN}] \tag{6.3}$$

Na rys. 6.5 przedstawiono prostą regresji, krzywe ufności dla prostej regresji, wyznaczone na poziomie ufności 90 % oraz wartości sił F_m i $F_{st,p}$ zestawione w tabeli 6.2.



Rys. 6.5. Wyznaczona zależność $F_m = f(F_{st,p})$ dla siły w stojakach spowodowanej działaniem obciążenia dynamicznego sekcji od strony stropu

Fig. 6.5. Diagram of the relationship $F_m = f(F_{st,p})$ for the force in legs produced by dynamic load acting on a support unit from the roof

Ze względu na niewielką wartość wyrazu wolnego w równaniu prostej regresji przyjęto, że jej współczynnik kierunkowy m_{st} jest równy współczynnikowi przyrostu obciążenia K_d. Korzystając z wyników pomiarów sił w stojakach zestawionych w tabeli 6.2 stwierdzono, że przedział:

$$1{,}06 < m_{st} < 1{,}24 \tag{6.4}$$

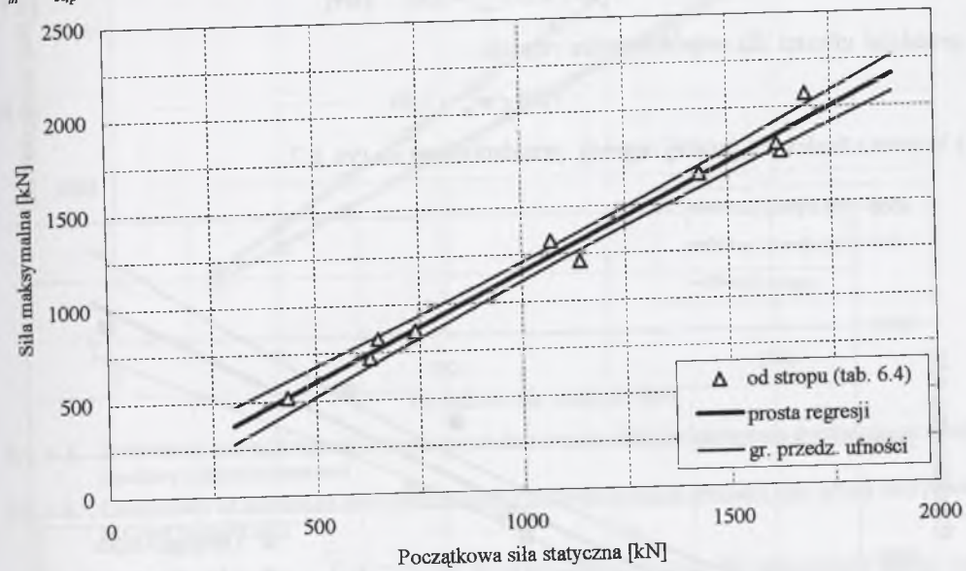
na poziomie ufności 90% otacza wartość współczynnika przyrostu obciążenia K_d w populacji generalnej.

Obliczenia wykonane dla wartości sił w stojakach zestawionych w tabeli 6.4 również wykazały, że pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ występuje bardzo silna zależność liniowa opisana równaniem (6.5)

$$F_m = 1{,}120\, F_{st,p} + 41{,}0\,; \quad [\mathrm{kN}] \tag{6.5}$$

Współczynnik korelacji wyznaczony dla 10-elementowej próby wynosi 0,990. Przyjmując poziom ufności 90% wyznaczono krytyczną wartość współczynnika korelacji, dla 10

stopni swobody wynoszącą 0,549, oraz stwierdzono, że w populacji generalnej wartość współczynnika korelacji jest istotnie większa od 0,970. Na rys. 6.6 przedstawiono prostą regresji, krzywe ufności dla prostej regresji, wyznaczone na poziomie ufności 90 % oraz wartości sił F_m i $F_{st,p}$ zestawione w tabeli 6.4.



Rys. 6.6. Wyznaczona zależność $F_m = f(F_{st,p})$ dla siły w stojakach spowodowanej obciążeniem dynamicznym sekcji o nie wyznaczonej wartości a_o (tabela 6.4)

Fig. 6.6. Diagram of the relationship $F_m = f(F_{st,p})$ for the force in legs produced by dynamic load of not determined value a_o acting on a support unit (table 6.4)

Również w przypadku wartości sił F_m i $F_{st,p}$ zestawionych w tabeli 6.4 można wykazać, że wartość współczynnika regresji liniowej m_n na poziomie ufności 90% określa zależność:

$$1{,}01 < m_n < 1{,}23 \tag{6.6}$$

Współczynniki regresji m_{st} i m_n, charakteryzujące obie rozpatrywane grupy przebiegów czasowych siły w stojakach, nieznacznie różnią się od siebie.

Stosując test równoległości prostych regresji [31] zweryfikowano, na poziomie ufności 90%, hipotezę statystyczną H_0: $m_{st} = m_n$ wobec hipotezy alternatywnej H_1: $m_{st} > m_n$ i stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0. Można więc z prawdopodobieństwem 90% przyjąć, że wartości współczynników regresji, charakteryzujących obie rozpatrywane grupy przebiegów sił w stojakach, nie różnią się istotnie. Pozytywny wynik testu równoległości prostych regresji upoważnia w tym wypadku do stwierdzenia, że zmiany siły w stojakach, zestawione zarówno w tabeli 6.2, jak też w tabeli 6.4, zostały spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji działającym od stropu.

Bardzo silna zależność liniowa pomiędzy maksymalną wartością siły w stojakach a wartością początkowej siły statycznej w stojakach istnieje również w przypadku działania obciążenia dynamicznego sekcji na spągnice [108]. W przypadku rozpatrywanej 9-elementowej próby: współczynnik korelacji pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ wynosi 0,944, natomiast krytyczna wartość współczynnika korelacji, dla poziomu ufności 90%, wynosi 0,582.

Przyjmując poziom ufności 90 % stwierdzono, że w populacji generalnej wartość współczynnika korelacji jest istotnie większa od 0,970 oraz wyznaczono:

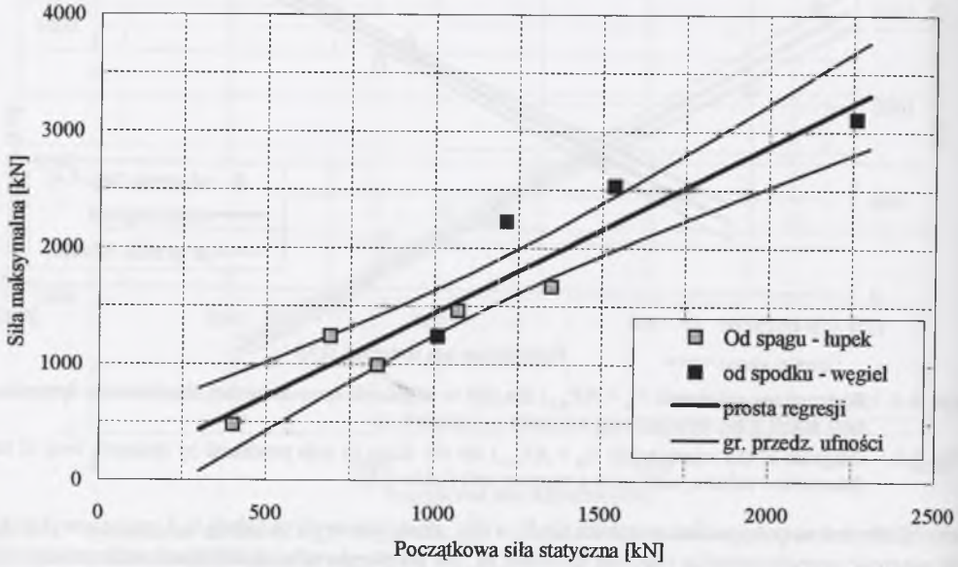
równanie prostej regresji:

$$F_m = 1{,}439 F_{st,p} + 3{,}5\,; \quad [\mathrm{kN}] \tag{6.7}$$

przedział ufności dla współczynnika regresji:

$$1{,}08 < m_{sp} < 1{,}80 \tag{6.8}$$

i krzywe ufności dla prostej regresji, przedstawione na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Wyznaczona zależność $F_m = f(F_{st,p})$ dla przebiegów siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego sekcji od strony spągu

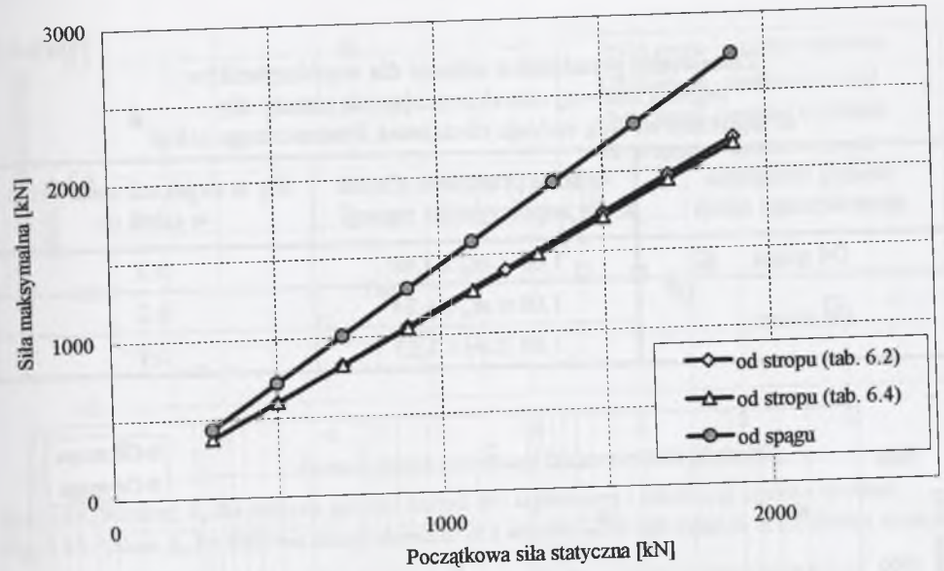
Fig. 6.7. Relationship $F_m = f(F_{st,p})$ for courses of the force in legs produced by dynamic load acting on a support unit from the floor

Obliczenia wykonano nie rozróżniając, czy w spągu wyrobiska zalega łupek czy węgiel. Dopiero przeprowadzenie znacznie większej liczby pomiarów przebiegu czasowego siły w stojakach spowodowanego obciążeniem dynamicznym sekcji od spągu umożliwi, między innymi, uwzględnienie parametrów charakteryzujących spąg wyrobiska.

Na rys. 6.8 porównano wykresy prostych regresji wyznaczonych dla trzech wyróżnionych grup przebiegów czasowych siły w stojakach.

Prosta regresji dla zbioru wartości siły w stojakach spowodowanej działaniem obciążenia dynamicznego na spągnice przebiega bardziej stromo od prostych regresji dla zbioru wartości siły w stojakach spowodowanej dynamicznym oddziaływaniem górotworu na stropnicę, i to zarówno dla tych zestawionych w tabeli 6.2, jak i w tabeli 6.4.

Stosując test równoległości prostych regresji, stwierdzono z prawdopodobieństwem 90%, że również w populacji generalnej współczynnik regresji m_{sp}, wyznaczony dla prze-



Rys. 6.8. Porównanie prostych regresji wyznaczonych dla różnych rodzajów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Fig. 6.8. Comparison of regression lines determined for different kinds of dynamic load acting on a powered roof support unit

biegów siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego sekcji od spągu, jest istotnie większy od wartości m_{st} wyznaczonej dla przypadków, kiedy obciążenie dynamiczne sekcji działa od stropu. Można więc na podstawie hipotezy statystycznej zweryfikowanej powyżej przyjąć założenie, że obciążenie dynamiczne sekcji działające na spągnice jest spowodowane wystąpieniem w spągu wyrobiska jakościowo innego zjawiska niż to, które wywołuje obciążenie dynamiczne sekcji od stropu. Wniosek ten jest zbieżny z badaniami Szuścika [85, 87] odnośnie do eksplozyjnych tąpań spągowych i spodkowych.

W tabeli 6.7 porównano przedziały ufności dla współczynników regresji liniowej, wyznaczone na poziomie ufności 90% dla trzech wyróżnionych grup przebiegów czasowych siły w stojaku.

W przypadku prostych regresji pokazanych na rys. 6.8 przedziały ufności dla współczynnika regresji liniowej i dla wartości średniej współczynnika przyrostu obciążenia K_d pokrywają się. Projektując sekcję obudowy zmechanizowanej do wyrobisk zagrożonych tąpaniami należy uwzględnić maksymalne wartości K_d wynikające z przedziałów ufności, podanych w tabeli 6.7.

Analizując wpływ innych czynników naturalnych i technicznych na zarejestrowane zmiany siły w stojakach trudno wykazać występowanie korelacji pomiędzy nimi. Na przykład, na rys. 6.9 pokazano wartości maksymalnych sił w stojakach występujące przy różnych gęstościach energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru.

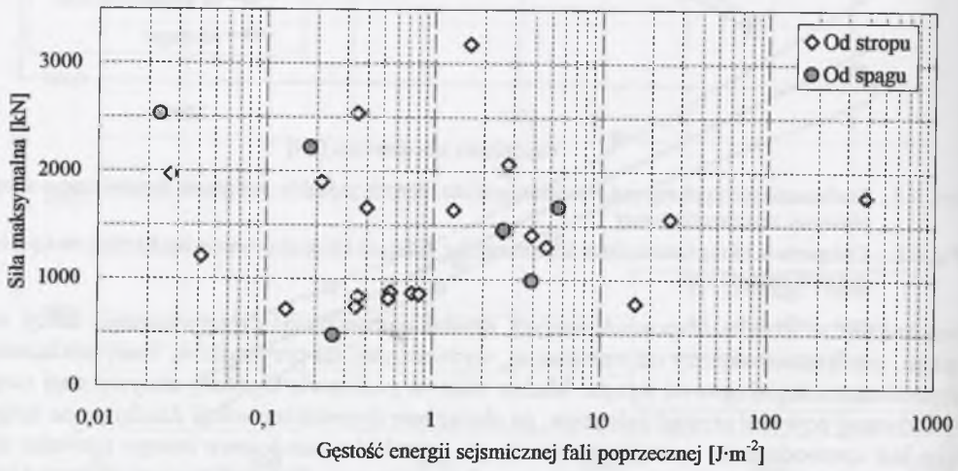
Na rys. 6.10 pokazano zależność pomiędzy współczynnikiem przyrostu obciążenia K_d a gęstością energii sejsmicznej fali poprzecznej dla różnych lokalizacji ogniska wstrząsu.

Rozpatrywano również wpływ odległości ogniska wstrząsu od miejsca pomiarów na parametry charakteryzujące zarejestrowane przebiegi siły w stojakach. Ze względu na małą

Tabela 6.7

Zestawienie przedziałów ufności dla współczynników regresji liniowej charakteryzujących zmiany siły w stojakach według rodzaju obciążenia dynamicznego sekcji

Rodzaj obciążenia dynamicznego sekcji	Granice przedziału ufności dla współczynnika regresji	Siły w stojakach zestawiono w tabeli nr:
Od spągu	$1{,}08 \le m_{sp} \le 1{,}80$	6.3
Od stropu	$1{,}06 \le m_{st} \le 1{,}24$	6.2
	$1{,}01 \le m_n \le 1{,}23$	6.4



Rys. 6.9. Maksymalna wartość siły w stojakach wyznaczona przy różnych gęstościach energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu wykonywania pomiarów obciążenia sekcji

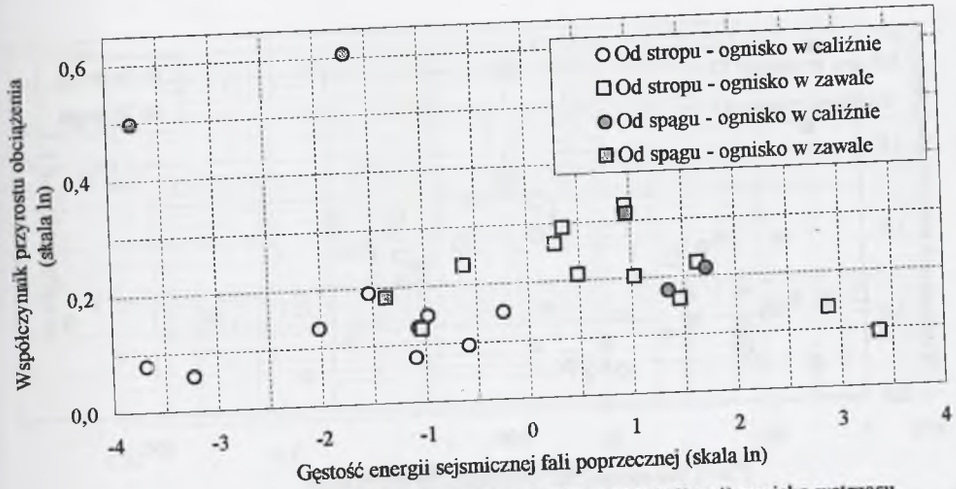
Fig. 6.9. Maximal value of force in legs determined at different energy densities of a transverse seismic wave on the site of measuring of the load acting on a support unit

dokładność wyznaczania współrzędnych ogniska wstrząsu w porównaniu z odległością ogniska od miejsca pomiarów, jak również na brak danych dotyczących współrzędnej pionowej, wyróżniono tylko dwie grupy przebiegów czasowych siły w stojakach, w zależności od usytuowania ogniska wstrząsu towarzyszącego zmianom siły w stojakach:

z – gdy ognisko wstrząsu towarzyszącego zmianom siły w stojakach znajdowało się w zawale lub w caliźnie w odległości do 20 m od czoła ściany,

w – gdy ognisko wstrząsu towarzyszącego zmianom siły w stojakach znajdowało się w caliźnie, w odległości ponad 20 m od czoła ściany.

Z obserwacji rozrzutu wartości współczynnika przyrostu obciążenia i gęstości energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru, przedstawionej na rysunku 6.10, wynika, że w przypadku gdy ognisko wstrząsu górotworu zlokalizowano w zawale, wartość K_d zmniejsza się wzrostem gęstości energii fali sejsmicznej. Tendencję tę można wyjaśnić większym rozpraszaniem i tłumieniem energii fali sejsmicznej w naruszonym ośrodku skalnym, jakim jest zawał w porównaniu z analogicznymi właściwościami calizny węglowej.



Rys. 6.10. Wartości K_d dla różnych gęstości energii fali sejsmicznej i lokalizacji ogniska wstrząsu

Fig. 6.10. Values K_d for different energy densities of a seismic wave and location of the tremor focus

Po dokonaniu transformacji zmiennych losowych według zależności (6.9):

$$\left.\begin{aligned} X^* &= \ln \varepsilon_{r,s} \\ Y^* &= \ln K_d \end{aligned}\right\} \qquad (6.9)$$

stwierdzono występowanie pomiędzy zmiennymi X^* i Y^* zależności korelacyjnej, charakteryzowanej współczynnikiem korelacji wynoszącym 0,587. W przypadku 12-elementowej próby i poziomu ufności 90% wartość krytyczna współczynnika korelacji wynosi 0,497, natomiast w populacji generalnej wartość współczynnika korelacji jest istotnie większa od 0,23. Tak więc zależność liniowa pomiędzy zmiennymi Y^* i X^* jest niska [61].

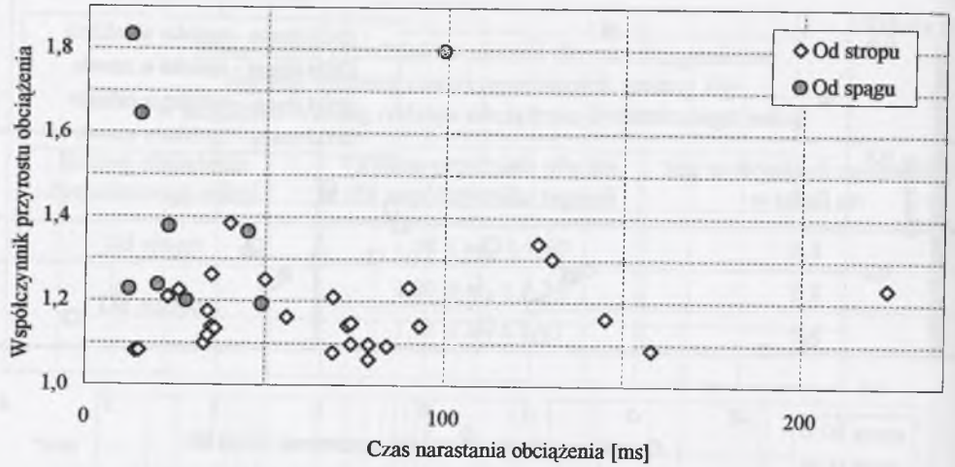
Większa intensywność zmian siły w stojakach, spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym od spągu, widoczna jest na wykresie przedstawionym na rys. 6.11.

Najkrótsze czasy narastania siły w stojakach i zarazem największe współczynniki przyrostu obciążenia wystąpiły wtedy, gdy obciążenie dynamiczne sekcji działało od spągu. Ustalenie ilościowych zależności pomiędzy tymi parametrami charakteryzującymi przebieg siły w stojakach wymaga przeprowadzenia dalszych pomiarów dołowych.

6.1.4. Średnie tempo przyrostu siły w stojakach

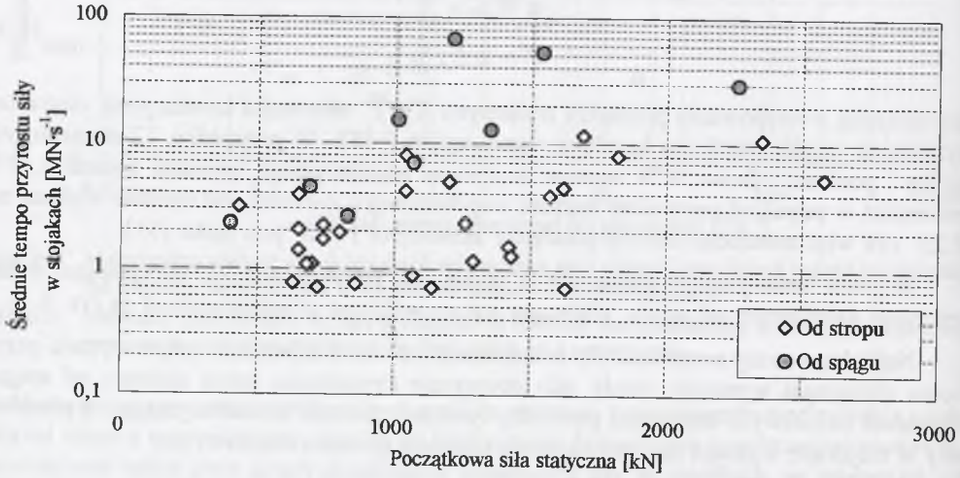
Korelacyjny wykres rozrzutu wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach $w_{F,n}$ charakteryzujących przebiegi czasowe siły w stojakach, różniące się początkową statyczną siłą w stojakach, przedstawiono na rys. 6.12.

Na obecnym etapie badań należy stwierdzić, że pomiędzy średnim tempem przyrostu siły w stojakach a początkową siłą statyczną korelacja nie występuje w przypadku przebiegów czasowych siły w stojaku spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji działającym zarówno od stropu, jak i od spągu. Na podstawie dotychczas zebranych danych, przedstawionych na rysunku 6.12, można jedynie stwierdzić, że w przypadku obciążenia dynamicznego działającego od spągu wartości $w_{F,n}$ są większe od wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach spowodowanej odciążeniem dynamicznym sekcji od strony stropu.



Rys. 6.11. Współczynniki przyrostu obciążenia wyznaczone przy różnych czasach narastania siły w stojakach i różnych rodzajach obciążenia dynamicznego sekcji

Fig. 6.11. Coefficients of the load increase determined at different times of force increase in legs and with different kinds of dynamic load acting on a support unit

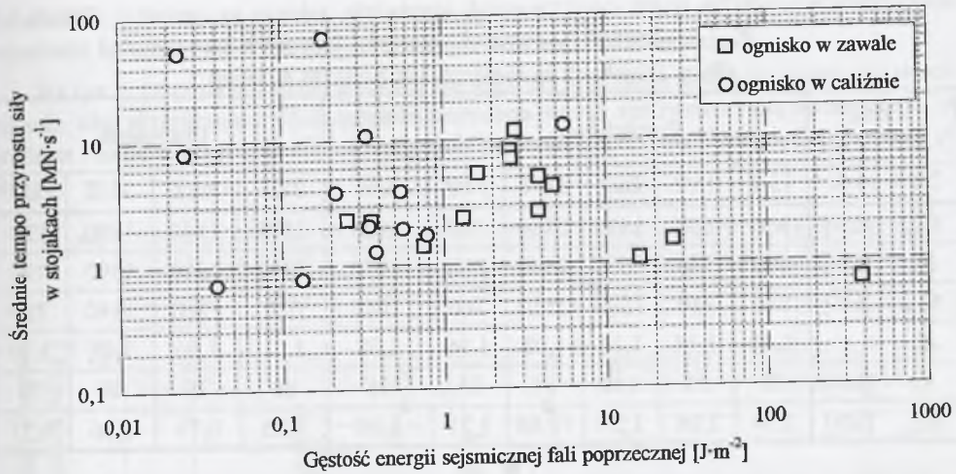


Rys. 6.12. Wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach wyznaczone przy różnych początkowych siłach statycznych w stojakach i różnych rodzajach obciążenia dynamicznego sekcji

Fig. 6.12. Values of the average rate of force increase in legs determined with different initial static forces in legs and with different kinds of dynamic load acting on a support unit

Na rys. 6.13 przedstawiono wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach charakteryzujące przebiegi czasowe siły w stojakach, którym towarzyszyły wstrząsy o różnej gęstości energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru.

Jakkolwiek pomiędzy wielkościami pokazanymi na rys. 6.13 nie występuje korelacja, to rozrzut punktów o współrzędnych ($\varepsilon_{r,s}$, $w_{F,n}$) charakteryzujących przebieg czasowy siły w stojakach po wstrząsie górotworu o ognisku zlokalizowanym w caliźnie bądź w zawale wskazuje na potrzebę wyróżnienia takich dwóch grup przebiegów czasowych.



Rys. 6.13. Wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach wyznaczone przy różnych gęstościach energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru obciążenia sekcji według lokalizacji ogniska wstrząsu, towarzyszącego obciążeniu dynamicznemu sekcji

Fig. 6.13. Values of the average rate of force increase in legs determined at different energy densities of a transverse seismic wave on the site of measuring of the load acting on a support unit according to the location of the focus of a bump accompanying the dynamic load acting on the support unit

Precyzyjniejsze określenie wpływu poszczególnych czynników na średnie tempo przyrostu siły w stojakach wymaga przeprowadzenia dalszych badań i zarejestrowania zmian siły w stojakach, zwłaszcza w tych przypadkach, kiedy obciążenie dynamiczne sekcji działa od spągu.

6.1.5. Wpływ strzelań wykonywanych w ścianie oraz samoistnych wstrząsów górotworu towarzyszących obciążeniu dynamicznemu sekcji, działającemu od stropu, na zmiany siły w stojakach

Jak już zaznaczono w rozdziale 5.5, w trakcie wykonywania pomiarów zarejestrowano zmiany siły w stojakach spowodowane zarówno samoistnymi zjawiskami dynamicznymi występującymi w górotworze, jak też odpaleniem ładunku materiału wybuchowego. W tabeli 6.8 zestawiono parametry charakteryzujące zmiany siły w stojakach zarejestrowane podczas różnego rodzaju strzelań. W tabeli 6.9 zestawiono wyniki obliczeń parametrów charakteryzujących korelację pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ dla zmian sił w stojakach spowodowanych samoistnymi wstrząsami górotworu i strzelaniem. Wyznaczone wartości współczynnika korelacji upoważniają do stwierdzenia, iż w obu rozpatrywanych grupach przebiegów zmian siły w stojakach pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ występuje bardzo silna zależność liniowa [117].

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przyrost siły w stojakach w trakcie samoistnego wstrząsu górotworu jest większy niż, zarejestrowany przy tej samej początkowej sile statycznej $F_{st,p}$, przyrost siły w stojakach spowodowany strzelaniem. Stosując test równoległości prostych regresji stwierdzono, że współczynnik regresji liniowej dla zmian siły w stojakach zarejestrowanych podczas obciążenia dynamicznego sekcji działającego od stropu, któremu towarzyszył samoistny wstrząs górotworu, jest istotnie większy od współczynnika regresji liniowej charakteryzującego zależność pomiędzy F_m i $F_{st,p}$ w przypadku obcią-

Tabela 6.8

Zestawienie parametrów charakteryzujących zmiany siły w stojakach zarejestrowane podczas strzelań

Rodzaj strzelania	Torpedujące					Wstrząsowe	Urabiające			
Seria pom.	15/Z	25/Z	26/Z	34/Z	37/Z	6/W	28/Z	30/Z	31/Z	2/S
$F_{st,p}$ [kN]	800	650	1430	2350	740	1820	1570	1140	1290	720
F_m [kN]	880	740	1660	2540	860	1970	1900	1210	1390	790
$F_{st,k}$ [kN]	840	710	1590	2510	780	1970	620	1200	1340	780
K_d	1,10	1,14	1,16	1,08	1,16	1,08	1,21	1,06	1,08	1,10
t_n [kN]	23	35	145	14	56	15	69	79	69	79
$w_{F,s}$ [kN]	1,94	2,06	1,27	10,86	1,71	8,00	3,85	0,71	1,16	0,71

Tabela 6.9

Zestawienie wyników obliczeń parametrów charakteryzujących korelację pomiędzy F_m a $F_{st,p}$ dla zmian siły w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji, działającym od stropu, któremu towarzyszył samoistny wstrząs górotworu oraz dla zmian siły w stojakach, spowodowanych strzelaniem

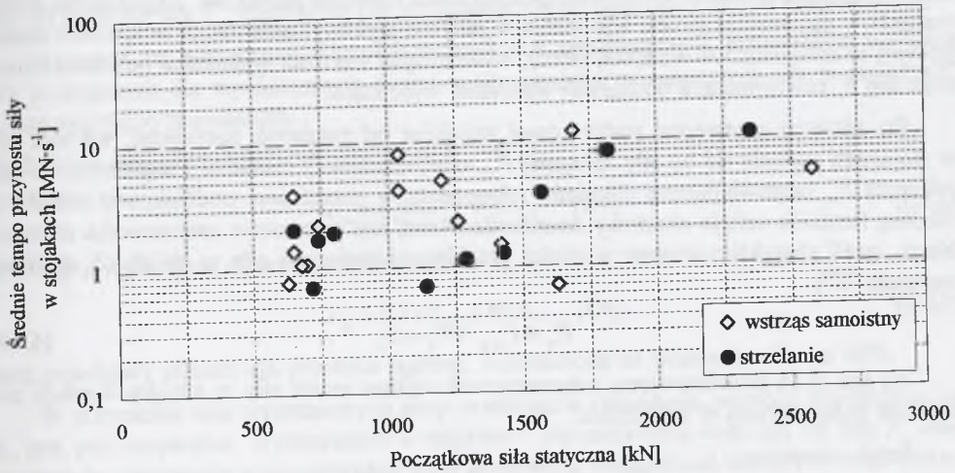
Zjawisko		Samoistny wstrząs górotworu	Strzelanie
Współczynnik korelacji	z próby	0,998	0,994
	wartość krytyczna	0,441	0,549
	w populacji generalnej	0,995	0,980
Równanie prostej regresji; [kN]		$F_m = 1{,}162 \cdot F_{st,p} - 3{,}9$	$F_m = 1{,}089 \cdot F_{st,p} - 31{,}6$
Przedział ufności dla współczynnika regresji		$1{,}12 < m < 1{,}20$	$1{,}01 < m < 1{,}17$

żenia dynamicznego sekcji spowodowanego strzelaniem. Taka relacja pomiędzy współczynnikami regresji liniowej jest z punktu widzenia użytkownika obudowy zmechanizowanej korzystna, gdyż wynika z niej, że jeżeli sekcja będzie przystosowana do warunków występowania tąpań stropowych, to przeniesie ona również obciążenie dynamiczne sprowokowane przez strzelanie.

Z drugiej jednak strony, ponieważ współczynnik przyrostu obciążenia spowodowanego odpaleniem ładunku materiału wybuchowego jest istotnie mniejszy od współczynnika przyrostu obciążenia zarejestrowanego podczas samoistnych wstrząsów górotworu, to problematyczne się staje oszacowanie wartości K_d dla samoistnych wstrząsów górotworu na podstawie pomiarów obciążenia spowodowanego wyłącznie strzelaniem. W związku z tym uzasadniona jest również konieczność prowadzenia żmudnych pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej występującego podczas samoistnego wstrząsu

górotworu, pomimo że pomiar obciążenia dynamicznego sekcji sprowokowanego przez odpalenie ładunku materiału wybuchowego jest znacznie prostszy.

Na rys. 6.14 przedstawiono porównanie wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach, charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji sprowokowane strzelaniem, ze średnim tempem przyrostu siły w stojakach podczas obciążenia dynamicznego sekcji od stropu.



Rys. 6.14. Średnie tempo zmiany siły w stojakach charakteryzujące wyróżnione grupy przebiegów czasowych siły w stojakach

Fig. 6.14. Average rate of force variation in legs characterizing the distinguished groups of time related courses of force in legs

Korzystając z aktualnie dostępnych wyników pomiarów dołowych obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, można jedynie stwierdzić, że w przypadku dwóch rozpatrywanych grup przebiegów czasowych siły w stojakach wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach mają porównywalne wartości. Uściślenie związku pomiędzy wartością $w_{F,n}$ a parametrami charakteryzującymi warunki górniczo-geologiczne panujące w wyrobisku wymagałoby przeprowadzenia dalszych pomiarów zmian sił w stojakach.

6.1.6. Wpływ współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem w warunkach obciążenia statycznego na zmiany siły w stojakach spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu

Z równań (6.2) i (6.4) wynika, że im mniejsza początkowa siła statyczna w stojakach $F_{st,p}$, tym mniejszą wartość osiąga również maksymalna siła w stojakach spowodowana obciążeniem dynamicznym sekcji. Z tego względu celowe jest rozpieranie stojaków ciśnieniem wstępnym o jak najmniejszej wartości, lecz niezbędnej do zapewnienia dobrych warunków utrzymania stropu wyrobiska. Zagadnienie doboru wartości ciśnienia wstępnego i ciśnienia roboczego do warunków naturalnych i technicznych panujących w wyrobisku czy też relacji pomiędzy wartościami tych parametrów jest odrębnym problemem nie rozpatrywanym w niniejszej pracy. Złożony ten problem jest przedmiotem wielu prac badawczych (np.: [1, 37, 75, 76, 87]), w których analizuje się zmiany ciśnienia w stojakach, zachodzące w znacz-

nie dłuższym przedziale czasu od przedziału czasu obejmującego zmiany siły w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu, analizowane w niniejszej pracy.

Rozpatrując poniżej wpływ poprawności doboru parametrów sekcji obudowy do warunków obciążenia statycznego na zmiany siły w stojakach, spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu, uwzględniono, w sposób uproszczony, tylko jeden aspekt problemu doboru parametrów sekcji do warunków naturalnych i technicznych w wyrobisku, związany pośrednio z doborem podporności roboczej stojaków. Zagadnienie oceny warunków utrzymania stropu wyrobiska w miejscu wykonywania badań omówiono szczegółowo w rozdziale 5.4 niniejszej pracy, wyznaczając wartości wskaźnika nośności stropu oraz siłę F_o równoważącą obciążenie statyczne wyrobiska.

Po odcięciu przestrzeni podtłokowej stojaków od magistrali zasilającej, wartość siły w stojakach zmienia się od siły wstępnej F_w, odpowiadającej ciśnieniu wstępnemu, do siły roboczej F_r, odpowiadającej ciśnieniu roboczemu w przestrzeni podtłokowej stojaków. Według Szuścika sekcja obudowy zmechanizowanej jest poprawnie zastosowana w wyrobisku, jeżeli charakterystyczne wartości przebiegu czasowego siły w stojakach spełniają warunek [87]:

$$F_w \le F_{st,p} \le F_r \le F_o \qquad (6.10)$$

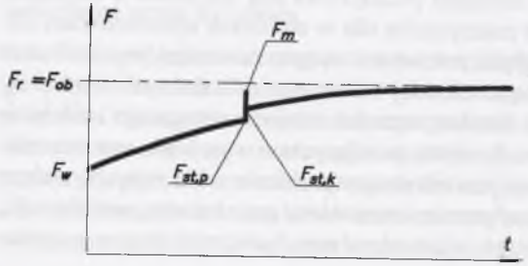
Na rys. 6.15 przedstawiono schematycznie wykres zmian siły w stojakach sekcji poprawnie zastosowanej w wyrobisku.

Jeżeli natomiast:

$$F_{st,p} \ge F_w > F_o \qquad (6.11)$$

wtedy według Szuścika sekcja obudowy zmechanizowanej nie jest poprawnie zastosowana, gdyż działa na strop siłami większymi, niż jest to konieczne dla utrzymania równowagi bryły górotworu odprężonego [87].

Sekcje obudowy zmechanizowanej zastosowane w ścianach, w których przeprowadzono pomiary dołowe, nie były wyposażone w układy do rozpierania stojaków do ciśnienia wstępnego o ustalonej wartości. W przypadku ręcznego systemu sterowania sekcją wartość ciśnienia wstępnego jest zmienną losową. W konsekwencji również początkowa siła statyczna w stojakach przyjmuje w poszczególnych seriach pomiarowych wartości spełniające warunek (6.10) lub (6.11). Poniżej, na przykładzie przebiegów czasowych siły w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu, zarejestrowanych w ścianie N 791 w KWK „Zabrze - Bielszowice", przeanalizowano wpływ warunków statycznej pracy sekcji określonych zależnościami (6.9) lub (6.10) na parametry charakteryzujące przebieg czasowy siły w stojakach.



Rys. 6.15. Zmiany ciśnienia w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję poprawnie zastosowaną w wyrobisku [87]

Fig. 6.15. Variation of pressure in legs due to dynamic action of the rock body exerted on a support unit correctly applied in underground working [87]

Przyjmując zatem jako kryterium relację pomiędzy wartościami sił $F_{st,p}$ i F_o, wyróżniono dwie grupy przebiegów czasowych siły w stojakach. Grupa I obejmuje przebiegi zmian siły w stojakach, spełniające warunek (6.10). Przebiegi czasowe zakwalifikowane do grupy I zarejestrowano wtedy, gdy według Szuścika warunki statycznej współpracy obudowy z górotworem zostały dobrane poprawnie [87]. Grupa II obejmuje te przebiegi czasowe sił w stojakach, które nie spełniają zależności (6.10). Współpraca obudowy zmechanizowanej z górotworem nie była wtedy poprawna, gdyż sekcja działała na strop siłą o wartości większej od wartości siły F_o, niezbędnej dla utrzymania równowagi bryły stropu bezpośredniego.

Na rys. 6.16 zaznaczono wartości początkowej siły statycznej, maksymalne wartości siły w stojakach dla wyróżnionych dwóch grup przebiegów czasowych siły w stojakach, proste regresji o równaniach:

dla I grupy obciążeń dynamicznych sekcji:

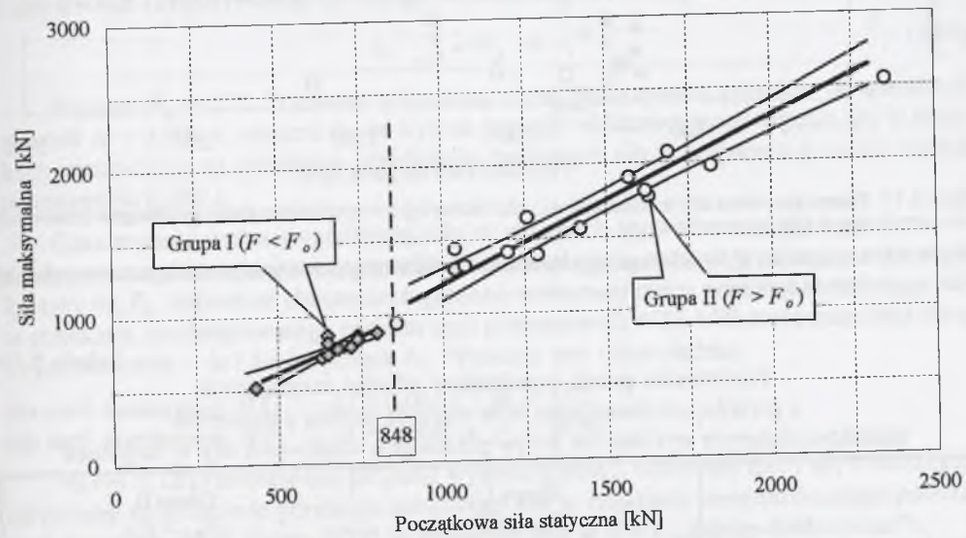
$$F_m = 0{,}96 F_{st,p} + 139; \quad [\text{kN}] \qquad (6.12)$$

dla II grupy obciążeń dynamicznych sekcji:

$$F_m = 1{,}11 F_{st,p} + 89{,}0; \quad [\text{kN}] \qquad (6.13)$$

oraz przedziały ufności dla prostych regresji, wyznaczone na poziomie ufności 90%.

W przypadku obu wyróżnionych grup przebiegów obciążenia wartość współczynnika K_d jest porównywalna. Wytwarzanie w stojakach siły statycznej większej od siły F_o niezbędnej do utrzymania w równowadze bryły górotworu obciążającej sekcję jest więc niekorzystne, gdyż im większa będzie początkowa siła statyczna $F_{st,p}$, tym proporcjonalnie większa będzie siła maksymalna F_m dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję [112].

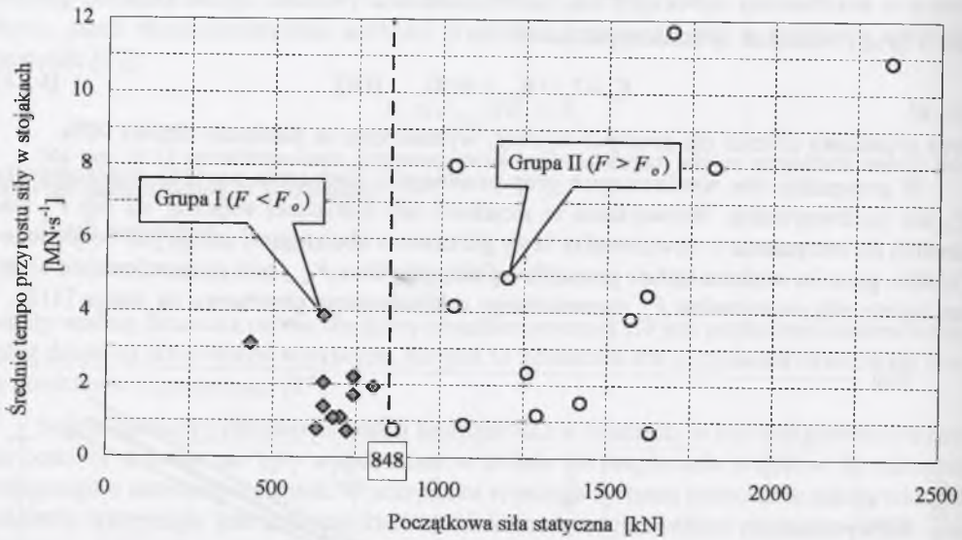


Rys. 6.16. Zależność $F_m = F_m(F_{st,p})$ dla wyróżnionych grup zmian siły w stojakach spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję

Fig. 6.16. Relationship $F_m = F_m(F_{st,p})$ for distinguished groups of the variation of force in legs produced by dynamic action of the rock body exerted on a support unit

Na rys. 6.17 przedstawiono wartości tempa przyrostu siły w stojakach $w_{F,n}$ dla poszczególnych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. W odróżnieniu od parametrów pokazanych na rysunku 6.16, pomiędzy tempem przyrostu siły $w_{F,n}$ a początkową siłą statyczną $F_{st,p}$ nie ma korelacji. W tabeli 6.10 podano wartości granic przedziałów ufności, wyznaczonych na poziomie ufności 90%, dla wartości średniej średniego tempa przyrostu siły $w_{F,n}$ i współczynnika przyrostu obciążenia K_d.

Rozpieranie stojaków z wypadkową siłą wstępną większą od F_o jest niekorzystne również ze względu na parametry charakteryzujące obciążenie dynamiczne sekcji, gdyż wtedy, w przypadku dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję, siła maksymalna F_m osiąga proporcjonalnie większe wartości, a tempo przyrostu siły w stojakach jest znacznie większe w porównaniu z wartościami $w_{F,n}$ charakteryzującymi zmiany siły w stojakach zarejestrowane w warunkach poprawnej współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem. Fakt ten można potraktować jako dodatkowe uzasadnienie konieczności starannego doboru



Rys. 6.17. Tempo przyrostu siły w stojakach $w_{F,n}$ charakteryzujące wyróżnione grupy przebiegów czasowych siły w stojakach

Fig. 6.17. Increase rate of force in legs $w_{F,n}$ characterizing the distinguished groups of time related courses of force in legs

Tabela 6.10

Porównanie granic przedziałów ufności otaczających z prawdopodobieństwem 90% wartość średnią parametrów charakteryzujących wyróżnione grupy przebiegów czasowych siły w stojakach

	Grupa I ($F_{st,p} < F_o$)	Grupa II ($F_{st,p} > F_o$)
$w_{F,n}$ [MN·s⁻¹]	1,24 ÷ 2,32	2,98 ÷ 6,17
K_d	1,13 ÷ 1,21	1,13 ÷ 1,23

ciśnienia wstępnego i ciśnienia roboczego w stojakach sekcji obudowy zmechanizowanej do warunków górniczo-geologicznych panujących w danym wyrobisku [106, 115].

6.1.7. Gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach

W odróżnieniu od wyników pomiarów oraz wniosków przedstawionych w rozdziałach 6.1.1 – 6.1.6, uzyskanych na podstawie analizy przebiegów czasowych sygnałów pomiarowych siły w stojakach, poniżej przedstawiono wyniki częstotliwościowej analizy tych sygnałów pomiarowych. Spośród wielu charakterystyk częstotliwościowych sygnałów pomiarowych, stosowanych m.in. w analizie modalnej układów mechanicznych, w niniejszej pracy wyznaczono jedynie wykresy gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, niezbędne do obliczenia gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

Obliczenia gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach wykonano wykorzystując procedury szybkiej transformacji Fouriera zawarte w programie MATLAB v. 5.0 [56]. Przedmiotem obliczeń jest spróbkowany przebieg czasowy siły w stojakach określony zależnością:

$$F(i) = F\big|_{t=k\cdot\Delta t}; \qquad k = 0, 1, \ldots, N_p - 1 \tag{6.14}$$

gdzie:

Δt – okres próbkowania sygnału pomiarowego siły w stojakach,

N_p – liczba próbek dyskredytowanego przebiegu czasowego $F(t)$.

W dalszych obliczeniach przyjęto:

$$N_p = 2^n; \qquad n \in N \tag{6.15}$$

Czas trwania rozpatrywanego przebiegu wypadkowej siły w stojakach T_o wynosi więc:

$$T_o = N_p \cdot \Delta t \tag{6.16}$$

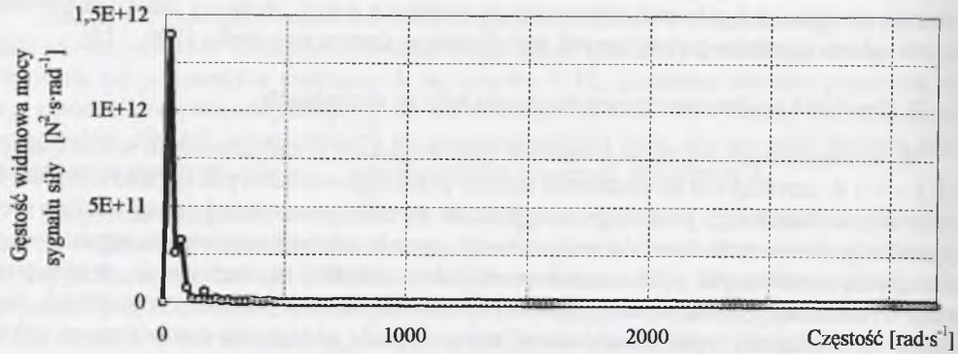
Przyjęto N_p = 256. Ponieważ stosowany okres próbkowania sygnałów pomiarowych wynosił Δt = 0,001 s, oznacza to, że wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach wyznaczono na podstawie przebiegów czasowych siły w stojakach o czasie trwania wynoszącym 0,256 s.

Czas trwania zmian wypadkowej siły w stojakach spowodowany dynamicznym oddziaływaniem górotworu jest w przypadku większości analizowanych przebiegów czasowych krótszy od T_o. Jedynie w obliczeniach gęstości widmowej mocy przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego podczas serii pomiarowych 4/Z i 4/W, stosowano inne okresy próbkowania – Δt i liczby próbek N_p. Wynosiły one odpowiednio:

dla serii pomiarowej 4/Z – Δt = 0,001 s N_p = 512,
dla serii pomiarowej 4/W – Δt = 0,0001 s N_p = 2048.

Na rys. 6.18 przedstawiono przykład wykresu gęstości widmowej mocy siły w stojakach, otrzymany na podstawie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego podczas serii pomiarowej 1/Z (ściana N791 w pokładzie 502 w KWK „Zabrze-Bielszowice").

Ponieważ przedmiotem obliczeń jest ciąg czasowy dany wzorem (6.14), to wyznaczona ocena gęstości widmowej mocy sygnału ma postać widma prążkowego, a rozdzielczość gęstości widmowej mocy sygnału $\Delta\omega$, definiowana jako odległość pomiędzy sąsiednimi



Rys. 6.18. Przykład wykresu gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach

Fig. 6.18. Example of a diagram of power spectrum of the signal of force in legs

prążkami widma (wyznaczonymi wartościami gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach), wynosi:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N_p \cdot \Delta t} \tag{6.17}$$

Dla $\Delta t = 0{,}001$ s i $N_p = 256$ otrzymano $\Delta\omega = 24{,}5$ rad·s^{-1}. W przypadku serii pomiarowych 4/Z i 4/W rozdzielczość gęstości widmowej mocy sygnału $\Delta\omega$ wynosi odpowiednio:

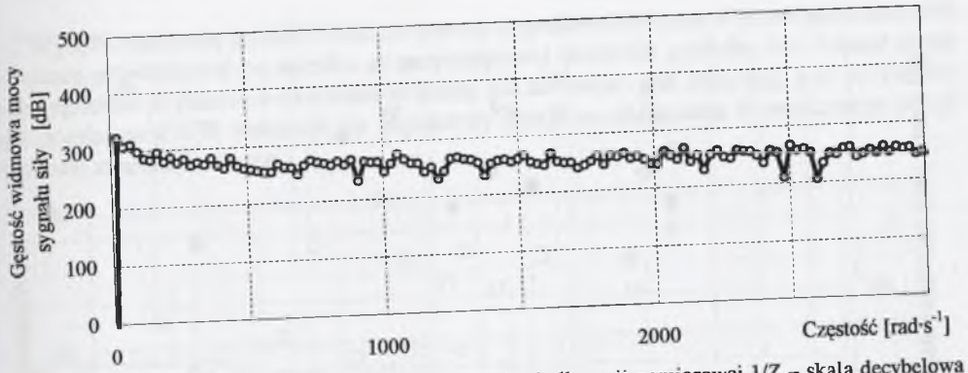
dla serii pomiarowej 4/Z – $\Delta\omega = 12{,}3$ rad·s^{-1},
dla serii pomiarowej 4/W – $\Delta\omega = 30{,}7$ rad·s^{-1}.

Wartości gęstości widmowej mocy $S_F(\omega)$ sygnału siły w stojakach zaznaczono na rysunku wyróżnikiem w postaci nie zaczernionego punktu. Linia ciągła łącząca poszczególne wyznaczone wartości $S_F(\omega)$ służy jedynie do poprawienia czytelności zaprezentowanego wykresu i nie należy jej traktować jako rezultatu interpolacji funkcji $S_F(\omega)$. Stwierdzenie powyższe dotyczy wszystkich wykresów gęstości widmowej mocy zamieszczonych w niniejszej pracy.

Wykres gęstości widmowej mocy siły w stojakach pokazany na rys. 6.18 charakteryzuje jedno wyraźne maksimum dla częstości 24,5 rad·s^{-1}. Moc sygnału pomiarowego przypadająca na składowe o wyższych częstościach jest pomijalnie mała. Lokalne ekstrema gęstości widmowej mocy sygnału pomiarowego, występujące przy wyższych częstościach, widoczne są dopiero na wykresie gęstości widmowej mocy siły w stojakach, wykonanym w skali decybelowej (rys. 6.19).

Analizując gęstości widmowe mocy sygnałów siły, zarejestrowane podczas obciążenia dynamicznego sekcji, działającego na stropnicę czy też na spągnice, stwierdzono, że charakteryzują się one jednym wyraźnym maksimum występującym w paśmie częstości 24,5 ÷ 73,5 rad·s^{-1}. Maksimum gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach występuje więc przy częstości mniejszej od pierwszej częstości własnej sekcji obudowy zmechanizowanej, która przykładowo dla sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS 15/31-Oz o wysokości 2,4 m wynosi 101 rad·s^{-1} [119].

Maksima gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach – a więc gęstości widmowej mocy sygnału odpowiedzi układu mechanicznego na wymuszenie zewnętrzne – występują



Rys. 6.19. Wykres gęstości widmowej mocy siły w stojakach dla serii pomiarowej 1/Z – skala decybelowa przy wartości progowej 10^{-10} N²·s·rad^{-1}

Fig. 6.19. Diagram of spectral density of power of the signal of force in legs for the measuring series 1/Z – decibel scale with threshold value of 10^{-10} N²·s·rad^{-1}

przy częstościach równych częstościom własnym układu, częstościom wymuszenia oraz ich wielokrotnościom. Ponieważ maksimum gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach występuje przy częstości nie większej niż 74 rad·s^{-1}, a więc mniejszej od 101 rad·s^{-1}, to wynika stąd, że w funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji również dominują składowe o częstości w paśmie 0 ÷ 74 rad·s^{-1} [119]. Wniosek powyższy jest zbieżny z wynikami pomiarów drgań stropu za pomocą konwergometru dynamicznego [50].

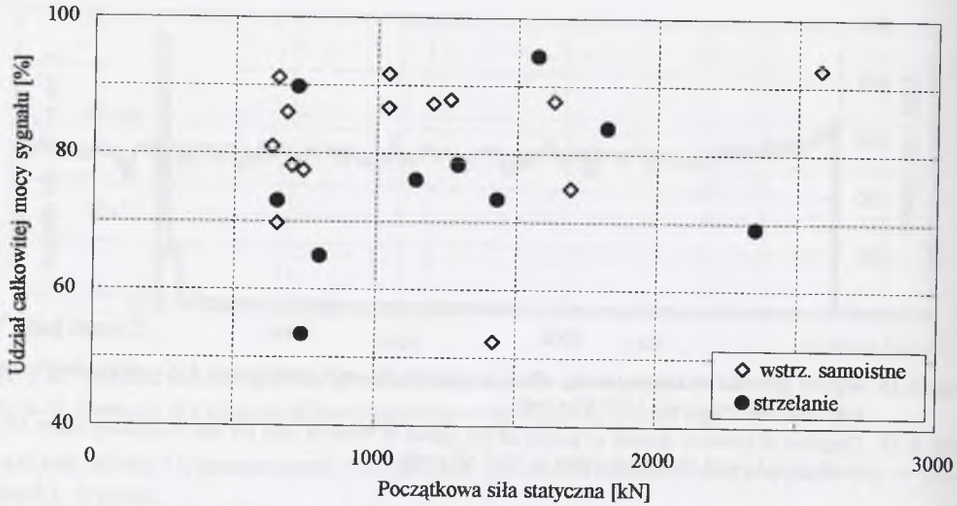
Z wykresu pokazanego na rys. 6.18 wynika, że znaczna część mocy sygnału siły w stojakach przypada na drgania o niskiej częstości. Spośród analizowanych 28 przebiegów czasowych siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego od stropu tylko w siedmiu seriach pomiarowych moc sygnału siły w paśmie częstości 0 ÷ 88 rad·s^{-1} stanowi mniej niż 75% całkowitej mocy sygnału. Na rys. 6.20 przedstawiono wyniki obliczeń udziału całkowitej mocy sygnału w paśmie częstości 0 ÷ 88 rad·s^{-1}.

Wyróżniono wyniki obliczeń dla zmian siły w stojakach, którym towarzyszył samoistny wstrząs górotworu oraz wartości udziałów całkowitej mocy sygnału siły zarejestrowanych podczas strzelania. Najmniejszy odsetek całkowitej mocy sygnału w paśmie częstości 0 ÷ 88 rad·s^{-1}, wynoszący 52%, odnotowano w przypadku serii pomiarowej nr 9/Z zarejestrowanej w ścianie N791 w pokładzie 502. Zmianom siły w stojakach towarzyszył wstrząs górotworu o energii $4 \cdot 10^4$ J. Ognisko wstrząsu zlokalizowano w zawale blisko miejsca badań. Wykres gęstości widmowej mocy zarejestrowanych zmian siły w stojakach pokazano na rys. 6.21.

Nie stwierdzono również związku pomiędzy udziałem mocy sygnału siły w paśmie 0 ÷ 88 rad·s^{-1} a gęstością energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiaru obciążenia sekcji (rys. 6.22).

Przykłady wykresów gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach spowodowanej obciążeniem dynamicznym sekcji, działającym na spągnice, przedstawiono na rys. 6.23 ÷ 6.25.

W paśmie 0 ÷ 600 rad·s^{-1} zidentyfikowano 6 częstości drgań własnych sekcji obudowy zmechanizowanej FAZOS 15/31-Oz. Wynoszą one: 101 rad·s^{-1}, 149 rad·s^{-1}, 206 rad·s^{-1},



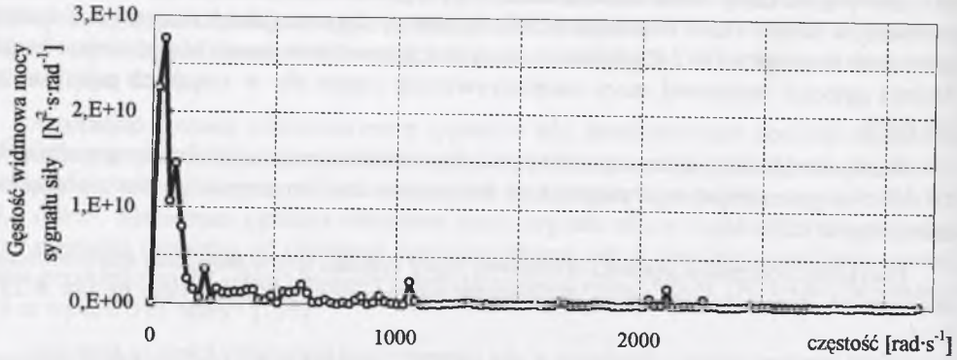
Rys. 6.20. Udział całkowitej mocy sygnału siły w stojakach w paśmie częstości 0 ÷ 88 rad·s^{-1}

Fig. 6.20. A proportion of the total power of the signal of force in legs within the frequency band 0 ÷ 88 rad ·s^{-1}

390 rad·s^{-1}, 457 rad·s^{-1} i 530 rad·s^{-1} [98, 110]. W odróżnieniu od wykresów gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach spowodowanej obciążeniem dynamicznym sekcji, działającym od stropu, na wykresach pokazanych na rys. 6.23 ÷ 6.25 również przy częstościach większych od 100 rad·s^{-1} widoczne są lokalne maksima funkcji.

W tabeli 6.11 zestawiono informacje dotyczące funkcji gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach spowodowanej obciążeniem dynamicznym sekcji, działającym od spągu.

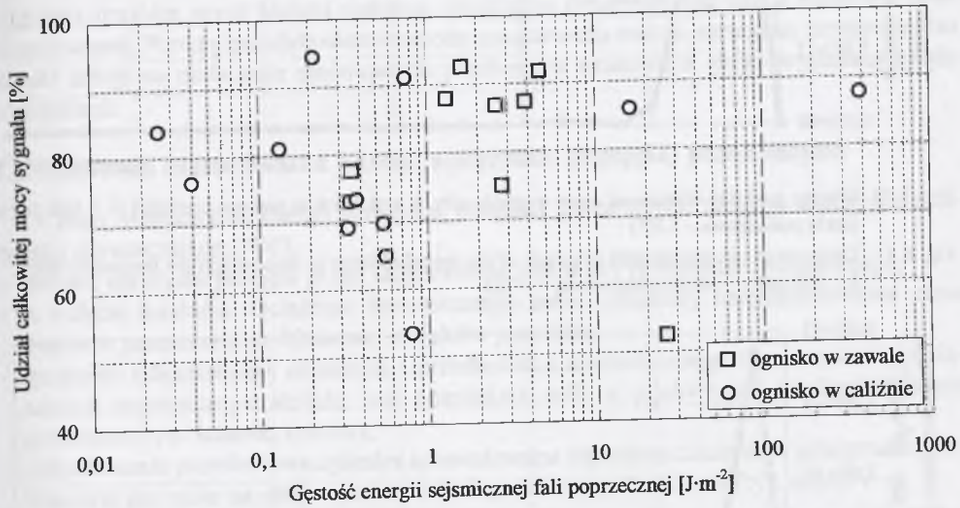
W większości serii pomiarowych, podczas których obciążenie dynamiczne sekcji działało na spągnice, udział mocy sygnału siły w paśmie 0 ÷ 88 rad·s^{-1} jest równie wysoki, jak w przypadku zmian siły w stojakach spowodowanej działaniem obciążenia zewnętrznego na stropnicę. Wynika stąd, że w funkcji gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, zarejestrowanym podczas tych serii pomiarowych, wyraźnie dominują składowe o częstości mieszczącej się w paśmie do 88 rad·s^{-1} (dla serii pomiarowej 40/Z – do 220 rad·s^{-1}).



Rys. 6.21. Gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach – seria pomiarowa 9/Z

Fig. 6.21. Spectrum of power of the signal of force in legs – measuring series 9/Z

Wyjątek stanowią gęstości widmowe mocy sygnałów 3/W oraz 7/W, zarejestrowanych w ścianie prowadzonej po spodku w przystropowej warstwie pokładu 501. Udział mocy tych sygnałów w paśmie o częstości większej niż 88 rad·s^{-1} jest znaczący, a w przypadku serii pomiarowej 3/W wskazuje na impulsowy charakter obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.



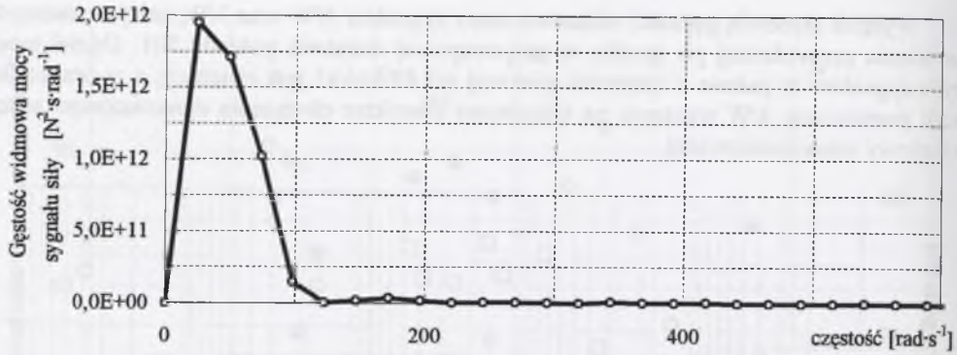
Rys. 6.22. Wpływ gęstości energii fali sejsmicznej – $\varepsilon_{r,s}$ oraz lokalizacji ogniska wstrząsu na udziały całkowitej mocy sygnału siły w stojakach w paśmie częstości 0 ÷ 88 rad·s^{-1} (obciążenie dynamiczne sekcji działało od stropu)

Fig. 6.22. Effect of the energy density of a seismic wave – $\varepsilon_{r,s}$ and location of the bump focus on proportions of the total power of the signal of force in legs within the frequency band 0 ÷ 88 rad·s^{-1} (dynamic load acting on a support unit from the roof)

Tabela 6.11

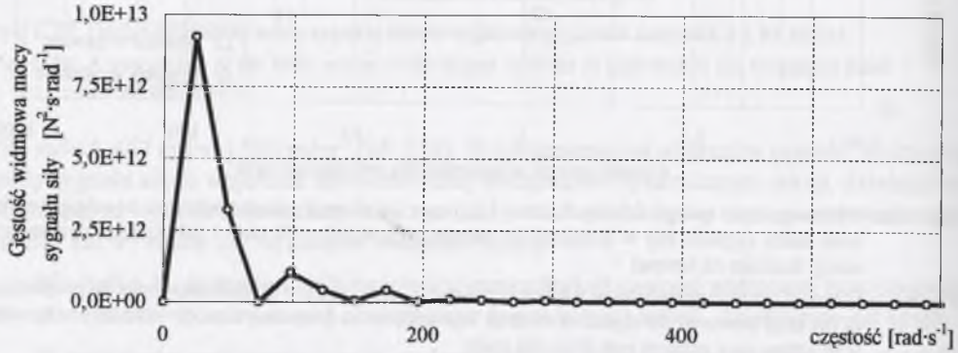
Zestawienie wartości częstości, przy których występuje maksimum gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach oraz procentowych udziałów mocy tego sygnału w paśmie 0 ÷ 88 rad·s^{-1} i 0 ÷ 220 rad·s^{-1} w przypadku obciążenia dynamicznego sekcji od strony spągu

Seria pomiarowa	ω [rad·s^{-1}]	Procentowy udział mocy sygnału w paśmie częstości:	
		0÷88 rad·s^{-1}	0÷220 rad·s^{-1}
3/Z	25	92,2	96,8
17/Z	25	90,4	97,3
27/Z	25	84,1	90,5
33/Z	74	80,8	85,8
40/Z	25	67,8	91,9
3/W	49	22,0	46,8
4/W	31	81,0	90,3
5/W	25	85,1	96,1
7/W	49	51,0	72,0



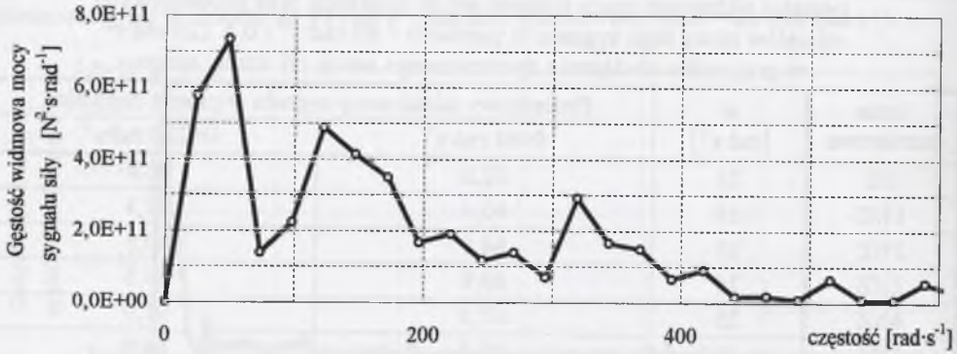
Rys. 6.23. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach w paśmie częstości 0 ÷ 600 rad·s⁻¹ (seria pomiarowa – 17/Z)

Fig. 6.23. Diagram of spectral density of power of the signal of force in legs within the frequency band 0 ÷ 600 rad·s⁻¹ (measuring series – 17/Z)



Rys. 6.24. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach w paśmie częstości 0 ÷ 600 rad·s⁻¹ (seria pomiarowa – 5/W)

Fig. 6.24. Diagram of spectral density of power of the signal of force in legs within the frequency band 0 ÷ 600 rad·s⁻¹ (measuring series – 5/W)



Rys. 6.25. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach w paśmie częstości 0÷ 600 rad·s⁻¹ (seria pomiarowa – 3/W)

Fig. 6.25. Diagram of spectral density of power of the signal of force in legs within the frequency band 0÷ 600 rad·s⁻¹ (measuring series – 3/W)

6.2. Energia sprężysta przejmowana przez stojaki podczas obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Jednym z parametrów, wykorzystywanych do oceny przydatności stojaków hydraulicznych do stosowania w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu, jest energia sprężysta przejęta przez stojaki wskutek obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Poniżej przedstawiono metodę oszacowania energii sprężystej przejętej przez stojaki sekcji na podstawie zmierzonych przebiegów czasowych zmian wypadkowej siły w stojakach.

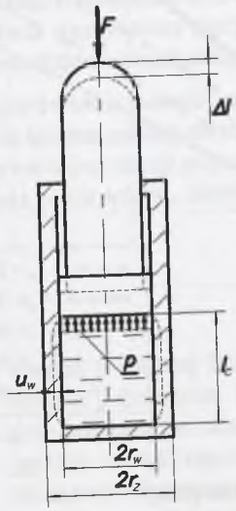
6.2.1. Metoda oszacowania energii sprężystej przejętej przez stojaki

Celem oszacowania energii sprężystej przejętej przez stojaki przyjęto następujące założenia upraszczające [109]:

- energia sprężysta przejęta przez stojak równa jest pracy obciążenia zewnętrznego,
- w trakcie działania obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej masa cieczy w przestrzeni podtłokowej stojaków jest stała,
- sprężyste odkształcenie rdzennika i przedłużacza mechanicznego spowodowane obciążeniem zewnętrznym stojaka jest pomijalnie małe w porównaniu z odkształceniem promieniowym ścianek cylindra,
- odkształcenie promieniowe cylindra spowodowane wzrostem ciśnienia w przestrzeni podtłokowej jest stałe na całej wysokości l_c słupa cieczy pod tłokiem (rys. 6.26).

Przemieszczenie głowicy stojaka Δl pod wpływem siły F jest spowodowane ściśliwością cieczy oraz sprężystym odkształceniem ścianek cylindra. Przemieszczenie u_w wewnętrznej ścianki cylindra, traktowanego jako rura grubościenna poddana działaniu ciśnienia wewnętrznego p, określa wzór [38]:

$$u_w = \frac{p \cdot r_w}{E_c}\left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}+\nu_c\right) \tag{6.18}$$



Rys. 6.26. Schemat stojaka przyjęty do obliczeń przemieszczenia głowicy stojaka

Fig. 6.26. Diagram of a leg assumed for calculations of the displacement of the leg head

gdzie:

$$\beta = \frac{r_z}{r_w}$$

r_w – promień wewnętrzny cylindra,
r_z – promień zewnętrzny cylindra,
E_c, ν_c – stałe materiałowe cylindra.

Wskutek wytworzenia ciśnienia p w przestrzeni roboczej stojaka objętość cieczy pod tłokiem zmniejszyła się o:

$$\Delta V = \pi \cdot e_w \cdot p \cdot r_w^2 \cdot l_c \tag{6.19}$$

gdzie:

r_w – promień wewnętrzny cylindra,
l_c – wysokość słupa cieczy pod tłokiem,
e_w – średni współczynnik ściśliwości emulsji olejowo-wodnej.

Obniżenie tłoka Δl wyznacza się z zależności:

$$V' = V - \Delta V = \pi \cdot r_w^2 \cdot l_c \cdot (1 - e_w \cdot p) = \pi \cdot (r_w + u_w)^2 \cdot (l_c - \Delta l) \tag{6.20}$$

Stąd:

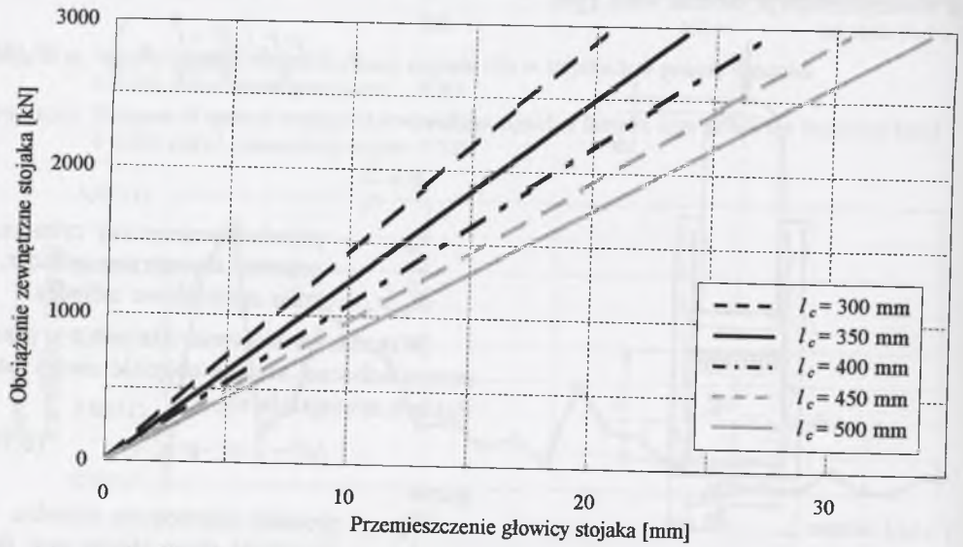
$$\Delta l = l_c \left[1 - \frac{1 - e_w \cdot p}{\left[1 + \frac{p}{E_c} \left(\frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1} + \nu_c \right) \right]^2} \right] \tag{6.21}$$

gdzie:

$$\beta = \frac{r_z}{r_w}$$

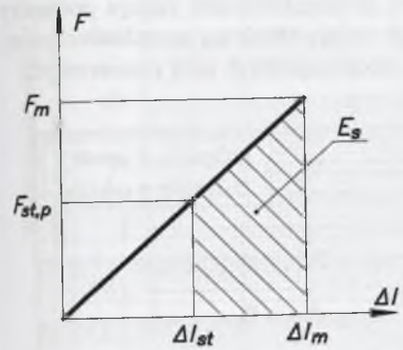
r_w – promień wewnętrzny cylindra,
r_z – promień zewnętrzny cylindra,
E_c, ν_c – stałe materiałowe cylindra,
l_c – wysokość słupa cieczy pod tłokiem,
e_w – średni współczynnik ściśliwości emulsji olejowo-wodnej,
p – ciśnienie w przestrzeni podtłokowej stojaka.

Wzór (6.21) określa związek pomiędzy przemieszczeniem Δl głowicy stojaka a ciśnieniem p w przestrzeni podtłokowej, wywoływanym działaniem obciążenia zewnętrznego F_s na stojak. Na rys. 6.27 przedstawiono wykresy zależności $F_s = F_s(\Delta l)$, wynikającej ze wzoru (6.21), wyznaczone dla stojaka sekcji obudowy typu FAZOS 15/31-Oz. Z wykresów przedstawionych na rysunku 6.27 wynika, że można założyć liniowość tej zależności[1], co ułatwia wyznaczenie energii sprężystej przejętej przez stojak, na podstawie zmierzonego przebiegu siły w stojakach (rys. 6.28).



Rys. 6.27. Zależność obciążenia stojaka obudowy zmechanizowanej typu FAZOS 15/31-Oz od przemieszczenia jego głowicy i wysokości słupa cieczy pod tłokiem – l_c

Fig. 6.27. Dependence of load of a leg of the FAZOS 15/31-Oz powered roof support on a displacement of its head and on height of the column of liquid under the piston rod – l_c



Rys. 6.28. Energia sprężysta przejęta przez stojaki w trakcie obciążenia dynamicznego sekcji

Fig. 6.28. Elastic strain energy taken up by legs during dynamic load acting on a support unit

Ostatecznie maksymalną energię sprężystą E_s przejętą przez stojaki w trakcie obciążenia dynamicznego określa zależność (6.22):

$$E_s = 0{,}5 \cdot (F_m + F_{st,p})(\Delta l_m - \Delta l_{st}) \tag{6.22}$$

gdzie:

F_m – maksymalna wartość siły w stojakach zarejestrowana podczas obciążenia dynamicznego sekcji,
$F_{st,p}$ – początkowa siła statyczna w stojakach,
Δl_m – przemieszczenie głowic stojaków po wpływem siły F_m,
$\Delta l_{st,p}$ – przemieszczenie głowic stojaków po wpływem siły $F_{st,p}$.

Wartości Δl_m i $\Delta l_{st,p}$ wyznaczono ze wzoru (6.21) traktując p jako średnie ciśnienie w przestrzeniach podtłokowych stojaków zabudowanych w sekcji.

6.2.2. Energia sprężysta przejęta przez stojaki a energia fali sejsmicznej w miejscu wykonywania pomiarów obciążenia sekcji

Korzystając z zależności (6.21) i (6.22) oraz zarejestrowanych przebiegów czasowych siły w stojakach wyznaczono energię sprężystą przejętą przez stojaki podczas poszczególnych obciążeń dynamicznych sekcji. Wynosi ona 170 ÷ 6990 J.

Celem porównania energii sprężystej przejętej przez stojaki z energią fali sejsmicznej działającej na badaną sekcję obudowy zmechanizowanej przyjęto, że energia fali sejsmicznej przekazywana jest sekcji poprzez stropnicę. Energię podłużnej i poprzecznej fali sejsmicznej, przejętą przez sekcję, określają wzory:

$$E_{r,p} = \varepsilon_{r,p} \cdot A_s \tag{6.23}$$

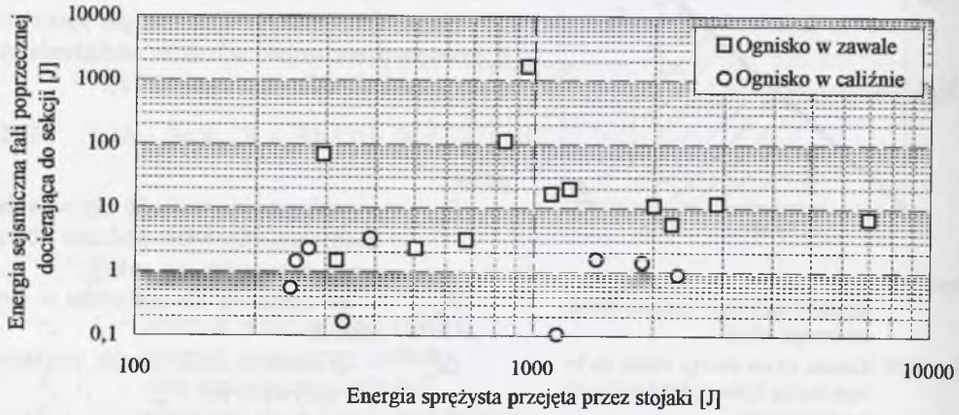
$$E_{r,s} = \varepsilon_{r,s} \cdot A_s \tag{6.24}$$

gdzie:

$E_{r,p}$ – energia podłużnej fali sejsmicznej przejętej przez sekcję obudowy,
$E_{r,s}$ – energia poprzecznej fali sejsmicznej przejętej przez sekcję obudowy,
A_s – pole powierzchni stropnicy,
$\varepsilon_{r,p}$ – gęstość energii sejsmicznej fali podłużnej w miejscu wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji, obliczona ze wzoru (6.1),
$\varepsilon_{r,s}$ – gęstość energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu wykonywania pomiarów obciążenia dynamicznego sekcji, obliczona ze wzoru (6.1).

[1] Błąd nieliniowości funkcji $F_s = F_s(\Delta l)$ nie przekracza 0,23%.

Energia sejsmiczna fali poprzecznej $E_{r,s}$, działająca na sekcję obudowy zmechanizowanej waha się w przedziale 0,1 J ÷ 1170 J. Na rys. 6.29 przedstawiono relacje pomiędzy energią sejsmicznej fali poprzecznej $E_{r,s}$ działającą na sekcję obudowy zmechanizowanej, a energią sprężystą E_s przejętą przez stojaki podczas poszczególnych serii pomiarowych.



Rys. 6.29. Zależność energii sejsmicznej fali poprzecznej – $E_{r,s}$ od energii sprężystej przejętej przez stojaki E_s

Fig. 6.29. Dependence of the energy of a transverse seismic wave $E_{r,s}$ on the elastic strain energy taken up by legs E_s

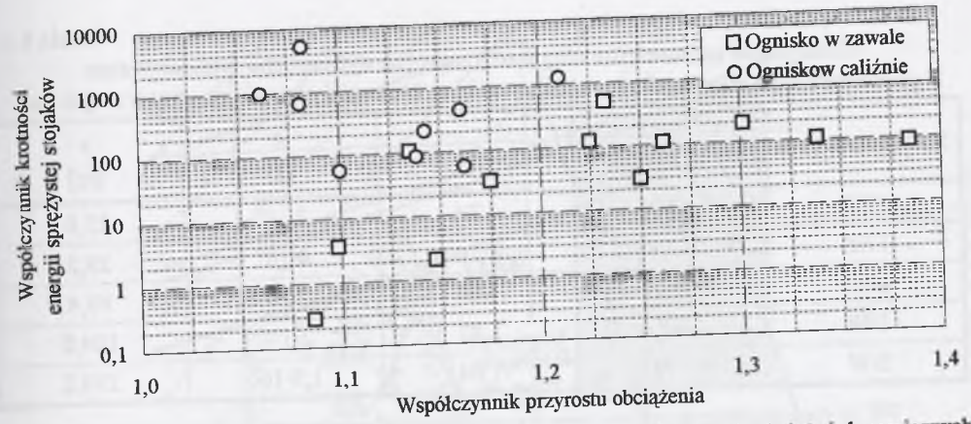
Energia fali sejsmicznej działającej na sekcję jest, w większości przypadków, znacznie mniejsza od energii sprężystej E_s, którą przejęły stojaki hydrauliczne wskutek obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej. Stosunek energii przejętej przez stojaki hydrauliczne i sumy energii sejsmicznej fal – podłużnej i poprzecznej określa współczynnik krotności energii sprężystej stojaków – ψ:

$$\psi = \frac{E_s}{E_{r,s} + E_{r,p}} \tag{6.25}$$

Na rys. 6.30 przedstawiono wartości współczynnika ψ otrzymane dla poszczególnych przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję obudowy zmechanizowanej od stropu, scharakteryzowanych przez współczynnik przyrostu obciążenia K_d.

Dane dotyczące wstrząsów towarzyszących zarejestrowanym przypadkom obciążenia dynamicznego sekcji oraz wartości współczynników ψ i K_d zestawiono w tabelach 6.12 i 6.13. Informacje o poszczególnych seriach pomiarowych uszeregowano w tabelach według rosnących wartości współczynnika krotności energii sprężystej stojaków ψ.

Energia sprężysta przejęta przez stojaki jest, w większości przypadków, co najmniej 30-krotnie większa od energii fali sejsmicznej działającej na powierzchnię stropnicy. Stwierdzenie powyższe nie dotyczy jedynie serii pomiarowych 4/Z, 11/Z i 9/Z (tabela 6.12) oraz 27/Z (tabela 6.13). Interpretację danych zamieszczonych w tabelach 6.12 i 6.13 utrudnia brak informacji o współrzędnej pionowej ogniska wstrząsu towarzyszącego obciążeniu dynamicznemu. Dotyczy to szczególnie serii pomiarowych 4/Z, 8/Z, 9/Z, 11/Z, 14/Z, 17/Z i 27/Z, którym towarzyszyły wstrząsy górotworu o ogniskach położonych bardzo blisko miejsca wykonywania pomiarów obciążenia sekcji – w odległości 13 ÷ 48 m, mierzonej



Rys. 6.30. Wartości współczynników krotności energii sprężystej stojaków – ψ dla obciążeń dynamicznych działających na sekcję obudowy zmechanizowanej od stropu

Fig. 6.30. Values of multiplication factors of elastic strain energy of legs – ψ for dynamic loads acting on a support unit from the roof

w płaszczyźnie pokładu. Wpływ odległości ogniska wstrząsu od płaszczyzny pokładu na wartość współczynnika krotności energii sprężystej stojaków na przykładzie wstrząsu o energii $1 \cdot 10^6$ J, towarzyszącego serii pomiarowej 4/Z, ilustruje wykres pokazany na rys. 6.31.

Wszystkie przypadki stosunkowo niskiej krotności energii sprężystej stojaków charakteryzuje usytuowanie ogniska wstrząsu w zawale w części pokładu pod wyeksploatowanymi partiami pokładów 501 i 416. Na rys. 6.32 wyróżnikiem w postaci litery **x** oznaczono położenie ogniska wstrząsu, towarzyszącego omawianym seriom pomiarowym oraz odległości od ogniska wstrząsu do badanej sekcji, której położenie oznaczono wyróżnikiem w postaci zaczernionego punktu.

Tabela 6.12

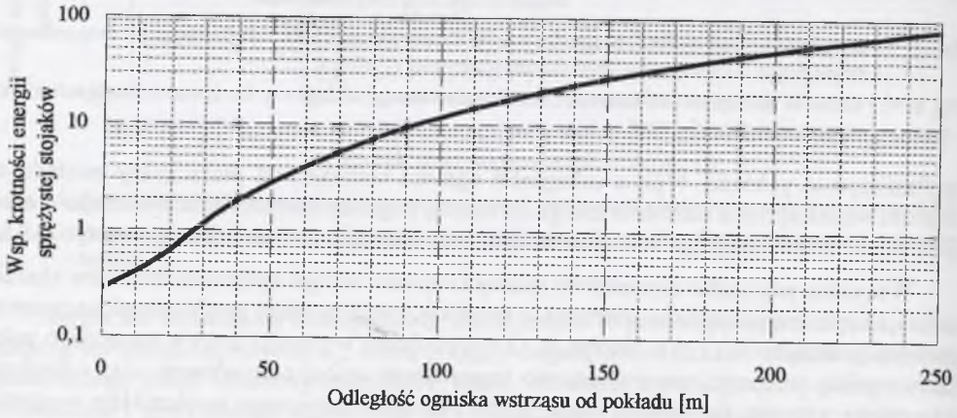
Zestawienie parametrów charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu od stropu według współczynników krotności energii sprężystej stojaków

Seria pom.	ψ	K_d	E [J]	r [m]	Seria pom.	ψ	K_d	E [J]	r [m]
4/Z	0.3	1.09	$1 \cdot 10^6$	18.0	24/Z	106.9	1.26	$1 \cdot 10^4$	45.3
11/Z	2.1	1.15	$8 \cdot 10^4$	24.4	36/Z	119.0	1.22	$5 \cdot 10^4$	44.7
9/Z	3.6	1.10	$4 \cdot 10^4$	14.1	35/Z	194.5	1.30	$3 \cdot 10^4$	50.0
8/Z	29.9	1.25	$6 \cdot 10^4$	38.1	23/Z	214.4	1.14	$1 \cdot 10^4$	87.5
14/Z	32.3	1.18	$1 \cdot 10^4$	18.0	26/Z	442.2	1.16	$4 \cdot 10^4$	102.6
15/Z	56.2	1.10	$2 \cdot 10^4$	61.8	5/Z	492.7	1.23	$3 \cdot 10^4$	45.3
37/Z	57.5	1.16	$1 \cdot 10^5$	111.8	34/Z	656.9	1.08	$7 \cdot 10^4$	141.2
25/Z	85.2	1.14	$4 \cdot 10^4$	107.0	30/Z	982.7	1.06	$1 \cdot 10^4$	154.0
1/Z	88.4	1.38	$3 \cdot 10^4$	36.4	28/Z	1250.7	1.21	$2 \cdot 10^4$	96.6
39/Z	104.1	1.14	$3 \cdot 10^4$	92.2	6/W	5256.1	1.08	$1 \cdot 10^3$	64.8
22/Z	104.5	1.34	$3 \cdot 10^4$	65.2					

Tabela 6.13

Zestawienie parametrów charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu od spągu według współczynników krotności energii sprężystej stojaków

Seria pomiarowa	ψ	K_d	E [J]	r [m]
27/Z	17,3	1.24	$2\cdot10^4$	25,0
17/Z	40,1	1.24	$4\cdot10^4$	29,2
40/Z	65,2	1.20	$2\cdot10^4$	89,4
3/W	4497,0	1.83	$2\cdot10^4$	104,5
5/W	41499.0	1.64	$1,5\cdot10^4$	239,2



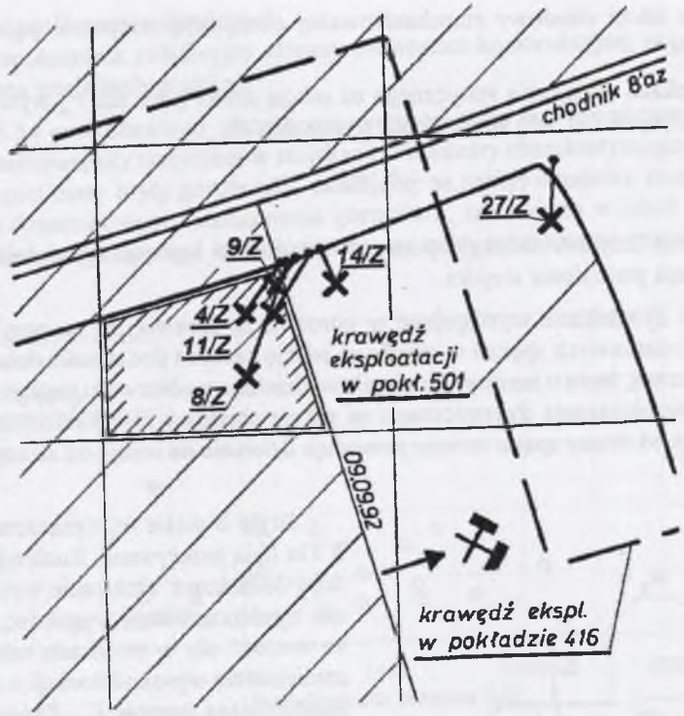
Rys. 6.31. Wpływ odległości ogniska wstrząsu od płaszczyzny pokładu na współczynnik krotności energii sprężystej stojaków – seria pomiarowa 4/Z, energia wstrząsu $1\cdot10^6$ J

Fig. 6.31. Effect of a distance between the bump focus and the seam plane on the multiplication factor of elastic strain energy of legs – measuring series 4/Z, shock energy $1\cdot10^6$ J

Liczba zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji, któremu towarzyszył wysokoenergetyczny wstrząs górotworu oraz brak innych parametrów charakteryzujących te wstrząsy – a szczególnie brak współrzędnej pionowej ogniska wstrząsu - uniemożliwia jednoznaczne objaśnienie przyczyn małej krotności energii sprężystej stojaków w przypadku sześciu wstrząsów górotworu, których ogniska zaznaczono na rys. 6.32.

Prawdopodobnym czynnikiem wpływającym na wartość współczynnika krotności energii sprężystej stojaków jest, oprócz nieznanej współrzędnej pionowej ogniska wstrząsu, sposób wyznaczania gęstości energii sejsmicznej działającej na stropnicę sekcji. Zależność (6.1) wyznaczono bowiem przy założeniu jednorodnych właściwości sprężystych ośrodka, w którym rozchodzi się fala sejsmiczna. Tłumienie fali sejsmicznej w górotworze naruszonym jest silniejsze niż w górotworze nienaruszonym. W związku z tym w przypadku zlokalizowania ogniska wstrząsu w zawale energia fali sejsmicznej faktycznie działająca na sekcję będzie mniejsza od wyznaczonej ze wzoru (6.1).

Powyższe zastrzeżenia dotyczą obliczeń gęstości energii fali sejsmicznej dla wszystkich zarejestrowanych wstrząsów, a nie tylko tych, których ogniska zaznaczono na rys. 6.32. Ogniska wstrząsów nie zaznaczone na rys.6.32 leżą jednak w większej odległości od badanej sekcji. Można więc przypuszczać, że w przypadku tych wstrząsów wpływ czynników utrudniających poprawne wyznaczenie gęstości energii fali sejsmicznej jest mniejszy.



Rys. 6.32. Usytuowanie ognisk wstrząsów górotworu towarzyszących obciążeniom dynamicznym sekcji charakteryzującym się małymi współczynnikami krotności energii sprężystej stojaków

Fig. 6.32. Location of focuses of rock bumps accompanying dynamic loads acting on a support unit characterized by low factors of multiplication of elastic strain energy of legs

W przypadku większości zarejestrowanych obciążeń dynamicznych sekcji obudowy zmechanizowanej energia sprężysta przejęta przez stojaki jest ponad 30-krotnie większa od energii fali sejsmicznej działającej na powierzchnię stropnicy. Wynika stąd, że źródłem energii działającej na sekcję nie jest sama fala sejsmiczna, lecz zmiany w stropie bezpośrednim (na przykład, przemieszczenia bloków skalnych tworzących górotwór naruszony, powstanie nowych linii spękań w górotworze naruszonym) spowodowane przejściem fali sejsmicznej przez górotwór naruszony lub wywołujące falę sejsmiczną.

6.2.3. Oszacowanie masy bryły stropowej działającej na sekcję oraz wartości parametrów charakteryzujących zaciskanie wyrobiska w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu

Przebiegi czasowe siły w stojakach można, po przyjęciu dodatkowych założeń upraszczających, wykorzystać do oszacowania masy bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu oraz do oceny wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia charakteryzujących zaciskanie wyrobiska – ściślej ruch stropnicy względem spągnicy sekcji.

Schemat sekcji obudowy zmechanizowanej obciążonej statycznie przedstawiono na rysunku 6.33a.

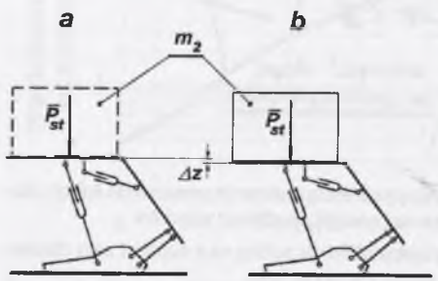
W warunkach obciążenia statycznego na sekcję działa tylko siła P_{st} wywołująca, zgodnie z zależnością (6.26), siłę w stojakach wynoszącą $F_{st,p}$

$$P_{st} = F_{st,p} \cdot n_r \tag{6.26}$$

gdzie:

n_r – współczynnik redukcyjny zależny od postaci konstrukcyjnej sekcji, w tym od kąta pochylenia stojaka.

Zjawisko dynamiczne występujące w górotworze sprawia, że na przykład wskutek wystąpienia dodatkowych spękań w stropie na sekcję zaczyna dodatkowo działać, bez prędkości początkowej, bryła o masie m_2 umownie wydzielona z górotworu naruszonego. Przyjęto, że działanie obciążenia dynamicznego na sekcję obudowy zmechanizowanej od strony stropu, czy też od strony spągu zawsze powoduje działanie na sekcję od strony stropu bryły o masie m_2.



Rys. 6.33. Schemat sekcji obudowy zmechanizowanej obciążonej statycznie i dynamicznie

Fig. 6.33. Diagram of a powered roof support unit under static and dynamic load

Bryłę o masie m_2 oznaczono na rysunku 6.33a linią przerywaną. Ruch tej bryły powoduje dodatkowe zaciskanie wyrobiska i sekcja zmniejsza swoją wysokość, co sprawia, że wartość siły w stojakach rośnie. Wskutek zmniejszenia wysokości sekcji o Δz siła w stojakach osiąga wartość F_m. Związek pomiędzy przemieszczeniem Δz a przyrostem wartości siły w stojakach od $F_{st,p}$ do F_m określa wzór (6.27):

$$\Delta z = \frac{\Delta l}{\sin\alpha} = \frac{c_s \cdot (F_m - F_{st,p})}{\sin\alpha} \tag{6.27}$$

gdzie:

α – kąt pochylenia stojaka,

Δl – zsuw stojaka,

c_s – współczynnik sprężystości stojaka.

Masę bryły działającej na sekcję w wyniku dynamicznego oddziaływania górotworu wyznaczono porównując energię sprężystą przejętą przez stojaki z sumą pracy siły P_{st} na przemieszczeniu Δz oraz zmiany energii potencjalnej masy m_2 przemieszczającej się o Δz (rys. 6.33 b). Ostatecznie masę bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu określa zależność:

$$m_2 = \frac{F_m \cdot \sin\alpha + F_{st,p} \cdot (\sin\alpha - 2 \cdot n_r)}{2 \cdot g} \tag{6.28}$$

gdzie:

F_m – maksymalna wartość siły przenoszonej przez stojaki w trakcie rozpatrywanego obciążenia dynamicznego sekcji,

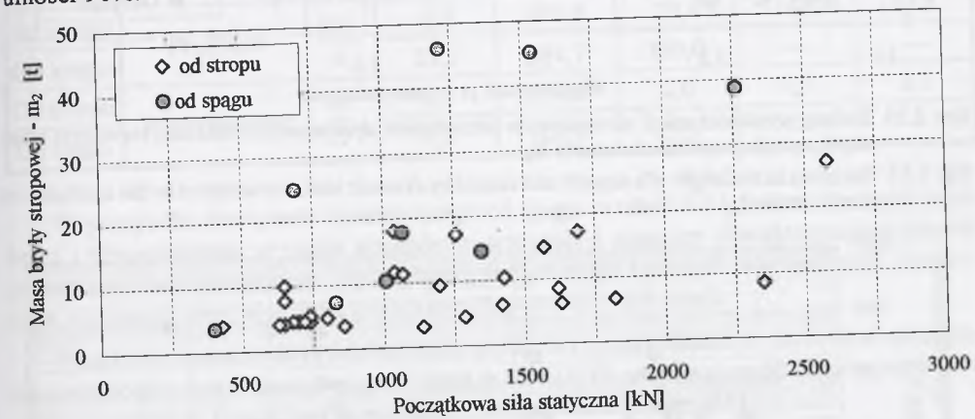
$F_{st,p}$ – początkowa statyczna siła w stojakach,

α – kąt pochylenia stojaków,

g – przyspieszenie ziemskie,

n_r – współczynnik redukcyjny zależny od postaci konstrukcyjnej sekcji, w tym od kąta pochylenia stojaka.

Na rys. 6.34 przedstawiono wyznaczone wartości masy m_2, wyznaczone dla różnych wartości początkowej siły statycznej w stojakach. Parametry charakteryzujące zbiór wyznaczonych wartości masy bryły górotworu, działającej na sekcję obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu, zestawiono w tabeli 6.14. Granice przedziału ufności otaczającego wartość średnią masy m_2 wyznaczono przyjmując poziom ufności 90%.



Rys. 6.34. Masa bryły stropowej – m_2, działająca na sekcję obudowy zmechanizowanej w przypadku rozpatrywanych rodzajów obciążenia dynamicznego sekcji

Fig. 6.34. Mass of the roof rock block – m_2 acting on a powered roof support unit in case of the considered kinds of dynamic load acting on a support unit

Tabela 6.14

Zestawienie parametrów charakteryzujących zbiór wyznaczonych wartości masy bryły stropowej działającej na sekcję m_2 według rodzajów obciążenia dynamicznego sekcji

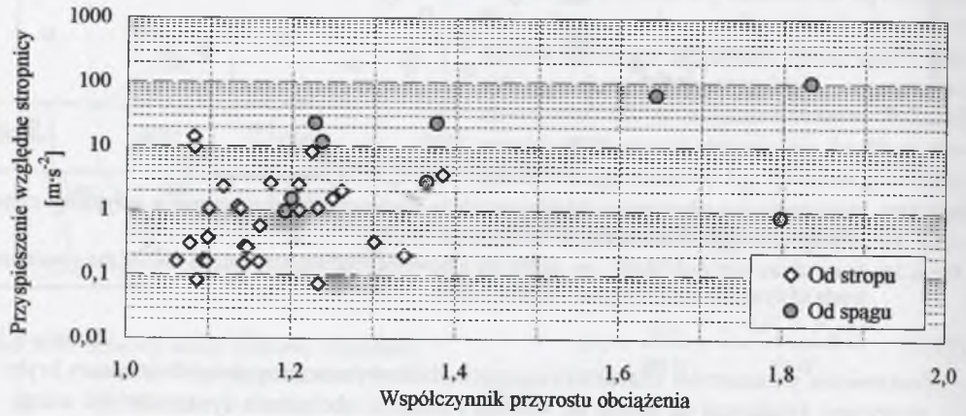
Rodzaj obciążenia dynamicznego	Wartość masy bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu [t]				
	Minimalna	Maksymalna	Średnia	Przedział ufności dla wartości średniej	
Od stropu	3,1	27,0	8,7	5,7	11,7
Od spągu	3,5	46,1	23,2	4,8	41,5

Zmiana wysokości sekcji Δz wyznaczona ze wzoru (6.27) jest równa zaciśnięciu wyrobiska. Na rys. 6.35 przedstawiono zależność zmiany wysokości sekcji od współczynnika przyrostu obciążenia K_d.

Znając czas narastania siły w stojakach można więc oszacować prędkości i przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy. Oszacowania dokonano zakładając jednostajnie zmienny ruch stropnicy podczas narastania siły w stojakach. Na rys. 6.36 przedstawiono oszacowane wartości przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy.

Rys. 6.35. Zmiany wysokości sekcji spowodowane obciążeniem dynamicznym charakteryzowanym przez współczynnik przyrostu obciążenia K_d

Fig. 6.35. Variation in the height of a support unit caused by dynamic load characterized by the coefficient of load increase K_d



Rys. 6.36. Oszacowane przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy

Fig. 6.36. Estimated accelerations in the movement of a canopy in relation to a base

Parametry charakteryzujące wyznaczone wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy zestawiono w tabeli 6.15. Granice przedziałów ufności otaczających wartości średnie tych parametrów wyznaczono przyjmując poziom ufności 90%.

Korzystając z wyników pomiarów wykonanych w wyrobisku można, w przypadku obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu, oszacować granice przedziałów ufności otaczających z ufnością 90% wartość średnią rozpatrywanego parametru charakteryzującego ruch stropnicy względem spągnicy. Wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia, określone w ten sposób, są mniejsze od podanych w tabeli 1.1. Należy jednak zauważyć, że obciążenie dynamiczne sekcji obudowy wywołujące zarejestrowane zmiany siły w stojakach nie spowodowało tąpnięcia w ścianie, natomiast wartości parametrów zestawionych w tabeli 1.1 oszacowano analizując skutki tąpnięć w ścianie. W związku z tym różnica pomiędzy wartościami przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia, podanymi w tabelach 1.1 i 6.15, jest uzasadniona.

Tabela 6.15

Zestawienie parametrów charakteryzujących przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy, spowodowanym obciążeniem dynamicznym sekcji

Rodzaj obc. dyn.	Parametr	Jedn.	Wartość parametru				
			Min.	Maks.	Średnia	Przedział ufności dla wartości średniej	
Od stropu	Przemieszczenie	mm	0,3	2,7	0,9	0,6	1,2
Od spągu			0,4	4,6	2,3	0,5	4,1
Od stropu	Prędkość	$\frac{mm}{s}$	6,3	105,6	29,4	14,9	43,8
Od spągu			21,3	608,7	195,0	—	—
Od stropu	Przyspieszenie	$\frac{m}{s^2}$	0,1	14,0	2,0	0,3	3,7
Od spągu			0,8	101,0	25,5	—	—

W przypadku obciążenia dynamicznego od spągu w tabeli 6.15 podano wartości prędkości i przyspieszenia w ruchu względnym stropnicy i spągnicy charakteryzujące jedynie pojedyncze serie pomiarowe. Wyznaczenie statystycznie istotnych wartości tych parametrów wymaga przeprowadzenia dodatkowych pomiarów dołowych.

Przedziały zmienności przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń w ruchu skał otaczających wyrobisko, porównywalne z podanymi w tabeli 6.15, uzyskano na podstawie pomiarów wykonywanych w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym [44].

6.3. Przyspieszenie stropnicy

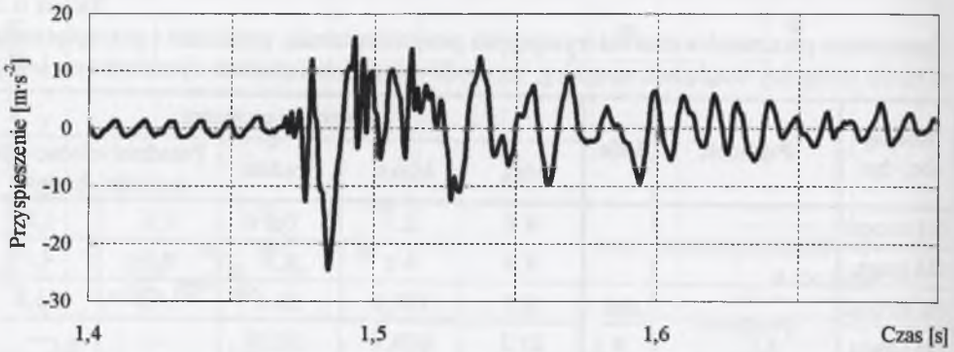
Podczas pomiarów wykonywanych w wyrobisku ścianowym, oprócz przebiegu czasowego siły w stojakach, rejestrowano również przebieg czasowy przyspieszenia stropnicy. Ze względu na usytuowanie czujnika w pobliżu środka masy stropnicy przyjęto, że zmierzone przyspieszenie jest składową pionową przyspieszenia środka masy stropnicy.

6.3.1. Parametry charakteryzujące przebieg czasowy sygnału przyspieszenia stropnicy

Ze względu na przyjęty dopuszczalny poziom zakłóceń określony zależnością (4.8) analizowano 27 przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy. Na rys. 6.37 przedstawiono przykładowo przyspieszenie zarejestrowane podczas serii pomiarowej 15/Z. Obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowało strzelanie wstrząsowe wykonane z chodnika nadścianowego. Odpalenie ładunków materiału wybuchowego usytuowanych około 60 m od badanej sekcji sprowokowało wstrząs górotworu o energii $2 \cdot 10^4$ J.

Przebieg czasowy przyspieszenia pokazany na rys. 6.38 charakteryzuje pewna okresowość (okres zmian wynosi około 0,005 s). Maksymalna wartość bezwzględna przyspieszenia wynosi 24,5 $m \cdot s^{-2}$, natomiast początkowe przyspieszenie stropnicy wynosi 2,86 $m \cdot s^{-2}$.

Odczytane wartości początkowego przyspieszenia stropnicy oraz maksymalnej wartości bezwzględnej przyspieszenia stropnicy zestawiono w tabeli 6.16. W przypadku gdy w trakcie pomiaru sygnał przyspieszenia został zakłócony, odczytano jedynie wartość po-



Rys. 6.37. Przebieg czasowy przyspieszenia stropnicy – seria pomiarowa 15/Z

Fig. 6.37. Time related course of the acceleration of a canopy – measuring series 15/Z

czątkowego przyspieszenia stropnicy. Przykład zakłóceń uniemożliwiających odczytanie maksymalnego przyspieszenia stropnicy przedstawiono na rys. 6.38. Przyczyną zakłóceń pokazanych na rys. 6.38 jest przekroczenie zakresu pomiarowego czujnika przyspieszenia.

Różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami bezwzględnymi przyspieszenia stropnicy, zestawionymi w tabeli 6.16, a wartościami przyspieszenia stropnicy w jej ruchu względem spągnicy, pokazanymi na rys. 6.36, są spowodowane:

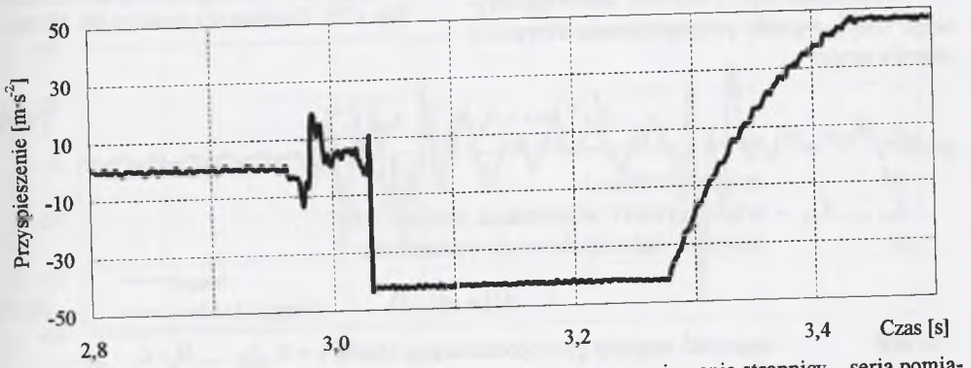
- przyjętą metodą oszacowania wartości przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy,
- przemieszczaniem się zarówno stropu, jak i spągu wyrobiska pod wpływem zjawisk dynamicznych zachodzących w górotworze,

Tabela 6.16

Zestawienie wartości początkowego przyspieszenia stropnicy – a_o i maksymalnej bezwzględnej wartości przyspieszenia – a_{max}

Seria pomiarowa	a_o [m·s^{-2}]	a_{max} [m·s^{-2}]	Seria pomiarowa	a_o [m·s^{-2}]	a_{max} [m·s^{-2}]
1/Z	16,9	70,1	28/Z	2,9	14,1
2/Z	1,2	9,1	31/Z	0,5	3,8
3/Z	-8,0	-	33/Z	-3,2	-
5/Z	25,0	63,2	34/Z	6,9	6,9
8/Z	16,0	-	35/Z	1,2	6,3
9/Z	4,3	52,6	39/Z	1,8	9,8
10/Z	3,2	37,2	40/Z	-1,5	6,1
11/Z	9,6	37,0	3/W	-12,6	-
14/Z	6,5	26,3	4/W	-1,3	13,9
15/Z	2,86	24,5	5/W	-5,9	31,0
17/Z	-4,0	34,5	6/W	3,9	5,0
22/Z	2,8	14,1	7/W	-5,5	7,3
25/Z	5,0	10,5	2/S	1,47	6,6
27/Z	-3,4	6,5			

- sposobem zamocowania czujnika przyspieszenia wewnątrz stropnicy – czujnik rozparty jest pomiędzy poszyciem górnym i dolnym stropnicy, co sprawia, że sygnał pomiarowy jest zależny od drgań całej stropnicy o konstrukcji skrzynkowej.



Rys. 6.38. Zakłócenia przebiegu czasowego sygnału pomiarowego przyspieszenia stropnicy – seria pomiarowa 33/Z

Fig. 6.38. Disturbances in the time related course of the measuring signal of acceleration of a canopy – measuring series 33/Z

W związku z powyższym metoda wyznaczania przemieszczenia stropu czy spągu na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy jest niewłaściwa.

Zarejestrowane, niezakłócone sygnały pomiarowe przyspieszenia stropnicy wykorzystano do wyznaczenia parametrów modalnych charakteryzujących właściwości dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej. Poniżej przedstawiono zastosowanie jednej z metod estymacji parametrów modalnych – metody identyfikacji parametrów modalnych na podstawie modeli autoregresyjnych – do wyznaczania częstości własnych i współczynników tłumienia sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku.

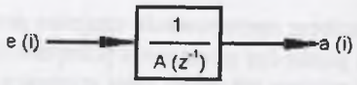
6.3.2. Wyznaczanie częstości własnych i współczynników tłumienia sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu

Analiza amplitudowo – częstościowa sygnału przyspieszenia wybranego punktu układu mechanicznego jest powszechnie stosowana w diagnostyce maszyn. Pozwala ona wyznaczyć częstości własne badanego obiektu wykorzystując zjawisko wzmocnienia amplitudy drgań w rezonansie.

Częstości własne drgań nietłumionych sekcji obudowy zmechanizowanej oraz współczynniki tłumienia odpowiadające tym częstościom własnym wyznaczono korzystając z modelu autoregresyjnego (AR) sygnału przyspieszenia. Parametry modalne obiektu badań są bowiem zależne od pierwiastków równania charakterystycznego modelu AR sygnału przyspieszenia [42]. Stosowanie tej metody zalecane jest szczególnie wtedy, gdy czas realizacji sygnału pomiarowego jest krótki [122].

Używając modelu AR można analizowany sygnał przyspieszenia $a(i)$, zapisany w postaci pliku cyfrowego, traktować jako wyjście dynamicznego filtru liniowego o transmitancji modelu AR pobudzanego białym szumem $e(i)$. W przypadku sygnałów, których widma za-

wierają wyraźne maksima, zaleca się stosowanie modelu typu AR przedstawionego schematycznie na rys. 6.39 [29].



Rys. 6.39. Schemat modelu typu AR

Fig. 6.39. Diagram of a model of the AR type

Wielomian $A(z^{-1})$ modelu autoregresyjnego (AR) sygnału przyspieszenia stropnicy określa wzór:

$$A(z^{-1}) = 1 + A_1 \cdot z^{-1} + A_{dA} \cdot z^{-dA} \tag{6.29}$$

gdzie:

dA – stopień modelu,

$A_1, \ldots, A_{dA}$ – współczynniki wielomianu modelu AR,

z^{-1} – operator jednokrokowego opóźnienia:

$$z^{-1} a(i) = a(i-1) \tag{6.30}$$

$a(i)$ – wartość sygnału przyspieszenia w chwili $i = 0, 1, \ldots, N_p-1$.

Proces identyfikacji modeli ciągów czasowych jest procesem iteracyjnym składającym się z następujących powtarzających się etapów [2]:

- wstępnej identyfikacji,
- estymacji parametrów modelu,
- weryfikacji modelu.

Zadanie wstępnej identyfikacji polega na znalezieniu odpowiedniej struktury modelu AR, czyli stopnia dA wielomianu $A(z^{-1})$. Najczęściej stosowaną metodą estymacji współczynników modelu typu AR jest metoda najmniejszych kwadratów. Stosując ją definiuje się błąd predykcji $\varepsilon(i)$:

$$\varepsilon(i) = a(i) - \hat{a}(i|i-1) \tag{6.31}$$

gdzie:

$a(i)$ – wartość sygnału w chwili i,

$\hat{a}(i|i-1)$ – predykcja badanego sygnału w chwili i na podstawie znajomości jego modelu oraz wartości sygnału do chwili $i-1$.

Minimalizacja następującego wskaźnika jakości:

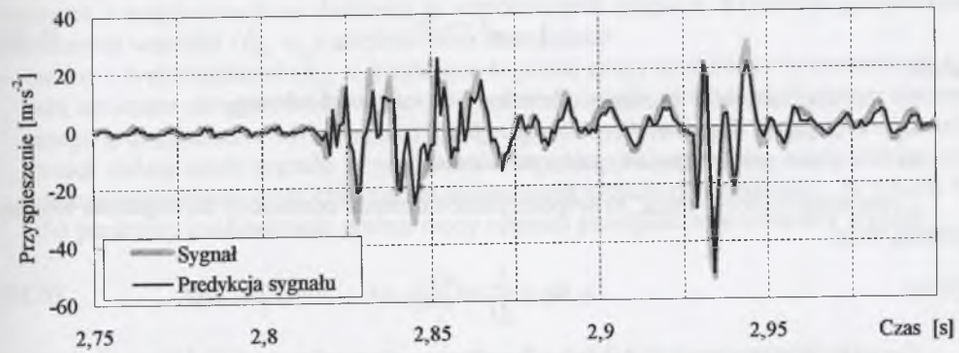
$$\min_{A_1, A_2, \ldots, A_{dA}} \sum_{i=1}^{N-1} (\varepsilon(i))^2$$

umożliwia wyznaczenie ocen parametrów A_i modelu regresyjnego analizowanego sygnału przyspieszenia. Zakłada się przy tym, że sygnał $a(i)$ jest reprezentowany przez swoje wartości dla chwil czasowych $i = 0, 1, \ldots, N_p-1$, gdzie N_p liczba próbek.

Weryfikacja modelu ma między innymi na celu przetestowanie adekwatności otrzymanego modelu, tzn. jego przydatności do realizacji założonych zadań. W tym celu sprawdza się, na ile bliskie są charakterystyki statystyczne (np. wariancja czy gęstość widmowa mocy) badanego ciągu i jego modelu.

Podczas analizy sygnałów przyspieszenia stropnicy stopień dA modelu oraz współczynniki A_i modelu AR wyznaczono korzystając z procedur obliczeniowych zawartych w pakiecie System Identification Toolbox programu MATLAB v.5.0 [56].

Na rys. 6.40 przedstawiono przykładowo przebieg czasowy przyspieszenia stropnicy $a(i)$ zarejestrowany podczas serii pomiarowej nr 9/Z oraz wykres jednokrokowej predykcji $\hat{a}(i|i-1)$ tego przebiegu, otrzymany na podstawie modelu AR, którego współczynniki wyznaczono dla przebiegu $a(i)$ metodą przedstawioną powyżej. Do wybrania struktury modelu



Rys. 6.40. Porównanie zmierzonego przebiegu przyspieszenia stropnicy z wykresem jednokrokowej predykcji tego przebiegu

Fig. 6.40. Comparison of the measured course of acceleration of a canopy with the diagram of one step prediction of this course

(oszacowania dA) wykorzystano kryterium informacyjne Akaike [2]. W przypadku rozpatrywanego przebiegu czasowego przyspieszenia stropnicy otrzymano: $dA = 18$ oraz wielomian $A(z^{-1})$ modelu AR o postaci (6.32):

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) = {} & 1 - 1{,}0475\, z^{-1} + 0{,}4000\, z^{-2} + 0{,}0847\, z^{-3} + 0{,}0285\, z^{-4} - 0{,}2126\, z^{-5} + \\ & + 0{,}0203\, z^{-6} + 0{,}1868\, z^{-7} - 0{,}0860\, z^{-8} + 0{,}0691\, z^{-9} + 0{,}0297\, z^{-10} + \\ & + 0{,}0101\, z^{-11} - 0{,}0796\, z^{-12} + 0{,}0430\, z^{-13} - 0{,}0029\, z^{-14} + 0{,}0128\, z^{-15} + \\ & - 0{,}0810\, z^{-16} + 0{,}1046\, z^{-17} + 0{,}0144\, z^{-18} \end{aligned} \tag{6.32}$$

Miarą dopasowania predykcji sygnału przyspieszenia, otrzymanej dla modelu AR, do przebiegu czasowego tego przyspieszenia jest stosunek odchylenia standardowego $\delta^2[a(i)]$ sygnału przyspieszenia stropnicy do odchylenia standardowego $\delta^2[\hat{a}(i|i-1)]$ jednokrokowej predykcji tego sygnału:

$$u = \frac{\delta^2[a(i)]}{\delta^2[\hat{a}(i|i-1)]} \tag{6.33}$$

Model tym dokładniej opisuje rzeczywisty przebieg przyspieszenia, im wartość parametru u jest bliższa 1,0. W przypadku modeli sygnałów przyspieszenia rozpatrywanych w niniejszej pracy

$$0{,}869 \le u \le 1{,}012 \tag{6.34}$$

Równanie charakterystyczne modelu autoregresyjnego (AR) sygnału przyspieszenia przyjmuje postać:

$$\lambda^n + A_1 \lambda^{n-1} + A_2 \lambda^{n-2} + \ldots + A_{dA-1} \lambda + A_{dA} = 0 \tag{6.35}$$

gdzie:

λ_r – pierwiastki równania charakterystycznego; $r = 1, 2, ..., n$.

Związek pomiędzy pierwiastkami równania charakterystycznego modelu AR sygnału przyspieszenia a wartościami własnymi określa zależność [121]:

$$\lambda_r = e^{(\delta_r + j\cdot\omega_r)\Delta t} \tag{6.36}$$

gdzie:

δ_r – współczynnik tłumienia odniesiony do częstości własnej,

ω_r – częstość drgań własnych tłumionych,

Δt – okres próbkowania sygnału pomiarowego.

Z równania (6.36) wynika, że współczynnik tłumienia odniesiony do częstości własnej określa wzór:

$$\delta_r = \frac{1}{\Delta t}\cdot \ln|\lambda_r|; \qquad r = 1, 2, \ldots, dA \tag{6.37}$$

Częstości drgań własnych tłumionych wyznacza się z zależności (6.38) wynikającej ze wzoru (6.36):

$$\omega_r = \frac{1}{\Delta t}\cdot \operatorname{arc\,tg}\frac{\operatorname{Im}(\lambda_r)}{\operatorname{Re}(\lambda_r)}; \qquad r = 1, 2, \ldots, dA \tag{6.38}$$

Częstości własne określa zależność:

$$\omega_{0,r} = \sqrt{\delta_r^2 + \omega_r^2}; \qquad r = 1, 2, \ldots, dA \tag{6.39}$$

Korzystając z powyższych zależności wyznaczono częstości drgań własnych tłumionych – ω_r, współczynniki tłumienia – δ_r oraz częstości własne – $\omega_{0,r}$ dla wszystkich 23 zarejestrowanych przebiegów czasowych sygnału przyspieszenia stropnicy.

Występowanie zakłóceń i błędów w procesie estymacji parametrów równania (6.35) powoduje, że nie wszystkie jego pierwiastki charakteryzują dynamikę układu. Niektóre spośród pierwiastków równania charakterystycznego opisują tzw. mody obliczeniowe [121]. Jedna z metod eliminacji modów obliczeniowych polega na uwzględnianiu w analizie tylko tych pierwiastków równania charakterystycznego, które występują w większości rozpatrywanych modeli AR. Postępowanie to jest podobne do badania, które z maksimów charakterystyki częstościowej wynikają z rezonansu układu, a które z błędów estymacji [121].

Zgodnie z procedurą estymacji lokalnych parametrów modalnych wartości pierwiastków równania charakterystycznego, charakteryzujące właściwości sekcji obudowy zmechanizowanej, wyznacza się drogą statystycznego opracowania wyników analizy zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy, spowodowanych określonym rodzajem obciążenia dynamicznego. W wyniku pomiarów w wyrobisku wyznaczono:

- 17 przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od stropu,
- 6 przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy spowodowanych obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od spągu.

Obliczenia częstości drgań własnych tłumionych oraz współczynników tłumienia przeprowadzono osobno dla każdej z wyróżnionych grup przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy. Z zależności (6.36) wynika, że pierwiastkom równania charakterystycznego o zbliżonych wartościach odpowiadają na płaszczyźnie (δ_r, ω_r) punkty o współrzędnych ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$) leżące blisko siebie.

Tok obliczeń częstości własnych sekcji i współczynników tłumienia sprowadza się więc do pogrupowania otrzymanych rozwiązań ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$), a następnie do uśrednienia częstości własnych i współczynników tłumienia w wyróżnionych grupach. Kryterium grupowania obliczonych wartości ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$) zdefiniowano następująco:

- punkty o współrzędnych ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$) należące do jednej grupy (o zbliżonych wartościach λ_r) leżą wewnątrz okręgu o średnicy $D = 150$ rad·s^{-1}. Przyjęto, że średnica D okręgu otaczającego grupę punktów o współrzędnych ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$) jest sześciokrotnie większa od rozdzielczości widma mocy sygnału przyspieszenia stropnicy. W przypadku czasu trwania sygnału przyspieszenia $T = 0{,}256$ s (okres próbkowania sygnału pomiarowego – $\Delta t = 0{,}001$ s, 256 punktów) rozdzielczość widma mocy sygnału przyspieszenia stropnicy wynosi:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} = 24{,}5 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1} \tag{6.40}$$

- okrąg o średnicy D otacza punkty o współrzędnych ($\delta_{r,i}$, $\omega_{r,i}$), wyznaczone dla:
  - co najmniej 8 przebiegów czasowych w przypadku przyspieszenia spowodowanego obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od stropu,
  - co najmniej 4 przebiegów czasowych w przypadku przyspieszenia spowodowanego obciążeniem dynamicznym działającym na sekcję od spągu.

Na rys. 6.41 i 6.42 przedstawiono zaznaczone punkty odpowiadające wyznaczonym wartościom $\delta_{r,i}$ i $\omega_{r,i}$ oraz okręgi wyróżniające podzbiory wartości $\delta_{r,i}$ i $\omega_{r,i}$ niezbędne do wyznaczenia, za pomocą kryterium grupowania sformułowanego powyżej, wartości częstości drgań własnych tłumionych ω_r oraz współczynników tłumienia δ_r charakteryzujących zidentyfikowane mody dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku. Wartości częstości własnych $\omega_{0,r}$ oraz współczynników tłumienia δ_r sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku zestawiono w tabeli 6.17.

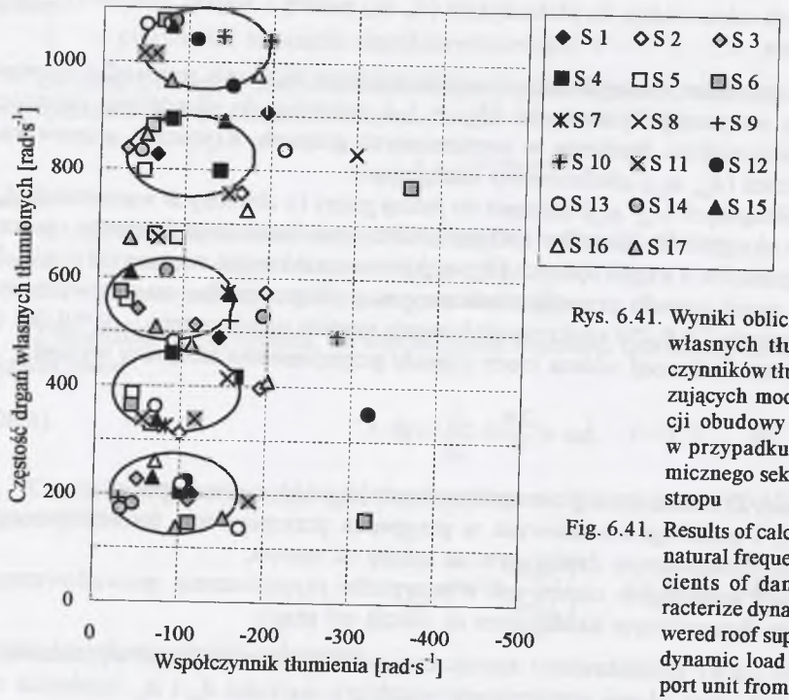
Parametry charakteryzujące mody dynamiczne sekcji rozpartej w wyrobisku ścianowym wykorzystano w rozdziale 7 do identyfikacji parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanych dynamicznemu oddziaływaniu górotworu, rozpatrywanych w rozdziale 4 niniejszej pracy.

Rodzaj dynamicznego obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej wpływa na liczbę zidentyfikowanych modów dynamicznych. Uogólnienie powyższego stwierdzenia wymaga jednak wykonania większej liczby pomiarów przyspieszenia stropnicy, szczególnie w przypadku działania obciążenia dynamicznego sekcji od strony spągu.

6.4. Podsumowanie

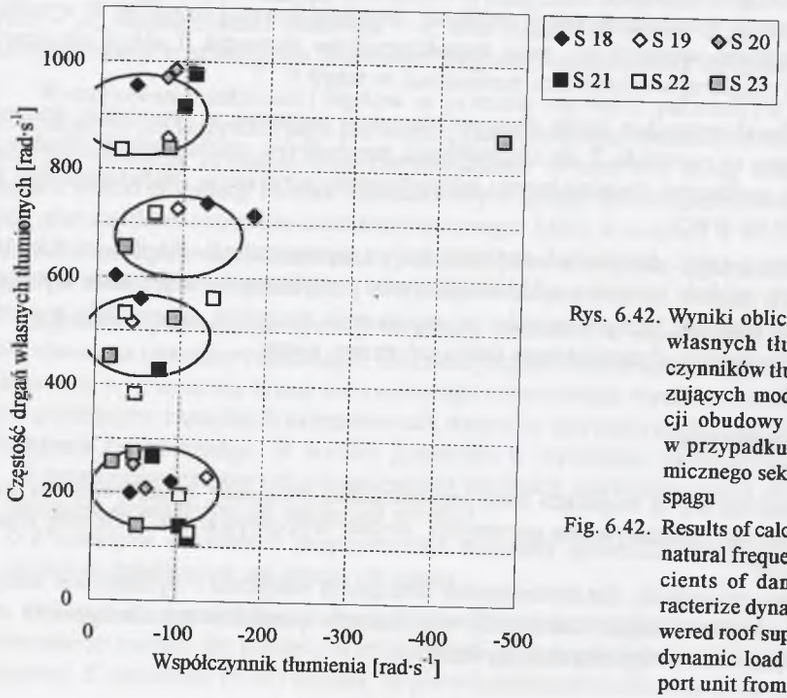
Wyniki pomiarów siły w stojakach oraz przyspieszenia stropnicy, zrealizowane w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu, zostały wykorzystane w niniejszej pracy w trzech aspektach:

- analizy wpływu czynników, determinujących obciążenia statyczne i dynamiczne sekcji, na parametry charakteryzujące zmianę siły w stojakach spowodowaną obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej,



Rys. 6.41. Wyniki obliczeń częstości drgań własnych tłumionych i współczynników tłumienia charakteryzujących mody dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej w przypadku obciążenia dynamicznego sekcji, działającego od stropu

Fig. 6.41. Results of calculations of damped natural frequencies and of coefficients of damping which characterize dynamic modes of a powered roof support unit in case of dynamic load acting on the support unit from the roof



Rys. 6.42. Wyniki obliczeń częstości drgań własnych tłumionych i współczynników tłumienia charakteryzujących mody dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej w przypadku obciążenia dynamicznego sekcji, działającego od spągu

Fig. 6.42. Results of calculations of damped natural frequencies and of coefficients of damping which characterize dynamic modes of a powered roof support unit in case of dynamic load acting on the support unit from the floor

Tabela 6.17

Zestawienie wyników obliczeń częstości własnych $\omega_{0,i}$ i współczynników tłumienia δ_i zidentyfikowanych modów dynamicznych sekcji według rodzaju obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

		Lp.	1	2	3	4	5	6
Obciążenie dynamiczne sekcji od stropu	Częstość własna [rad·s^{-1}]	Wartość średnia	217,2	382,4	546,3		851,5	1033,8
		Granice przedziału ufności	203	358	525		828	1011
			232	407	568		875	1057
	Współczynnik tłumienia [rad·s^{-1}]	Wartość średnia	-85,8	-89,8	-98,8		-76,2	-97,1
		Granice przedziału ufności	-103	-120	-160		-101	-121
			-69	-60	-79		-51	-73
Obciążenie dynamiczne sekcji od spągu	Częstość własna [rad·s^{-1}]	Wartość średnia	230,1		505,7	714,2	897,9	
		Granice przedziału ufności	207		464	666	849	
			254		547	763	947	
	Współczynnik tłumienia [rad·s^{-1}]	Wartość średnia	-71,7		-53,1	-80,6	-68,1	
		Granice przedziału ufności	-90		-76	-128	-91	
			-54		-31	-33	-45	

- oszacowania energii przejętej przez stojaki sekcji oraz wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia, charakteryzujących ruch względny stropnicy i spągnicy spowodowany dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej,
- zebrania danych umożliwiających identyfikację parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanych dynamicznemu oddziaływaniu górotworu.

Podstawowym kryterium podziału zarejestrowanych serii pomiarowych przyjętym w analizie wyników pomiarów jest rodzaj obciążenia dynamicznego sekcji, wywołującego obserwowane zmiany siły w stojakach i zmiany przyspieszenia stropnicy. Metoda określenia zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji, przedstawiona w rozdziale 4.1, oraz analiza informacji uzyskanych z kopalnianej stacji tąpań umożliwiła wyróżnienie 28 serii pomiarowych zarejestrowanych podczas dynamicznego oddziaływania górotworu na stropnicę sekcji oraz 9 serii pomiarowych, zawierających przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych zarejestrowane podczas dynamicznego oddziaływania górotworu na spągnicę sekcji. Wyróżnione

dwa rodzaje obciążenia dynamicznego sekcji charakteryzuje nie tylko inny zwrot obciążenia dynamicznego, lecz również różne wartości parametrów charakteryzujących towarzyszące im zmiany siły w stojakach.

Analizując zarejestrowane zmiany siły w stojakach wyróżniono trzy typy przebiegów czasowych wypadkowej siły w stojakach, różniące się relacjami pomiędzy wartościami początkowej i końcowej siły statycznej. Stwierdzono, że większość zarejestrowanych zmian siły w stojakach charakteryzuje końcowa siła statyczna $F_{st,k}$ większa od początkowej siły statycznej $F_{st,p}$. Taki przebieg czasowy siły w stojakach spowodowały przemieszczenia skał otaczających wyrobisko, skutkujące jego zaciskaniem. Jedynie pięć przebiegów czasowych siły w stojakach zostało spowodowanych silnie tłumionymi drganiami stropu. W tym przypadku: $|F_{st,k} - F_{st,p}| \leq 0{,}005 \cdot F_{st,p}$. Najrzadziej występowały przebiegi czasowe charakteryzujące się końcową siłą statyczną $F_{st,k}$ mniejszą od początkowej siły statycznej $F_{st,p}$. W tych przypadkach zjawiska dynamiczne występujące w górotworze spowodowały przejście skał otaczających wyrobisko w stan równowagi charakteryzujący się mniejszym statycznym obciążeniem sekcji obudowy zmechanizowanej.

Analizując związki pomiędzy różnymi parametrami charakteryzującymi przebiegi czasowe siły w stojakach oraz czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne stwierdzono istnienie bardzo silnej zależności liniowej pomiędzy maksymalną wartością siły w stojakach F_m a początkową statyczną siłą w stojakach $F_{st,p}$. Występuje ona w przypadku zmian siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego zarówno na stropnice, jak i na spągnice sekcji.

Stosując test równoległości prostych regresji wykazano, że w populacji generalnej współczynnik przyrostu obciążenia K_d, charakteryzujący zmiany siły w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu na spągnice sekcji, jest istotnie większy od współczynnika K_d dla siły w stojakach spowodowanej obciążeniem sekcji od stropu. Z dotychczas przeprowadzonych pomiarów dołowych wynika, że maksymalna wartość współczynnika przyrostu obciążenia wynosi:
$K_d = 1{,}80$ – dla obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu,
$K_d = 1{,}23$ – dla obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu.

Projektując sekcję obudowy zmechanizowanej przeznaczoną do wyrobisk zagrożonych tąpaniami należy uwzględnić wyżej podane maksymalne wartości współczynników przyrostu obciążenia, wynikające z wyznaczonych przedziałów ufności [114, 116].

Przebiegi czasowe sił w stojakach spowodowane działaniem obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji charakteryzuje również znacznie większe tempo przyrostu siły w stojakach w porównaniu z wartościami $w_{F,n}$ otrzymanymi dla obciążeń dynamicznych sekcji działających od stropu.

Analizując wpływ wyróżnionych zjawisk dynamicznych występujących w górotworze na zmiany siły w stojakach stwierdzono, że współczynnik przyrostu obciążenia K_d, obliczony dla zmian siły w stojakach zarejestrowanych podczas obciążenia dynamicznego sekcji działającego od stropu, któremu towarzyszył samoistny wstrząs górotworu, jest istotnie większy od współczynnika przyrostu obciążenia dla obciążenia dynamicznego spowodowanego strzelaniem. Taka relacja pomiędzy współczynnikami K_d dla omawianych grup przebiegów czasowych siły w stojakach jest z punktu widzenia użytkownika obudowy zmechanizowanej korzystna, gdyż wynika z niej, że jeżeli sekcja będzie przystosowana do warunków występowania tąpań stropowych, to przeniesie ona również obciążenie dynamiczne sprowokowane przez strzelanie. Z drugiej jednak strony, ponieważ współczynnik przyrostu obciążenia spowodowanego odpaleniem ładunku materiału wybuchowego jest istotnie mniejszy od współczynnika przyrostu obciążenia zarejestrowanego podczas samoistnych wstrząsów górotworu, to problematyczne się staje oszacowanie wartości K_d dla samoistnych wstrząsów górotworu na podstawie pomiarów obciążeń spowodowanych wyłącznie strzelaniem. Korzystając z aktualnie dostępnych wyników pomiarów dołowych obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, można jedynie stwierdzić, że w przypadku dwóch rozpatrywanych grup przebiegów czasowych siły w stojakach, wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach są porównywalne.

Współpraca sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem w warunkach obciążenia statycznego również wpływa na parametry charakteryzujące zmiany siły w stojakach spowodowane obciążeniem dynamicznym sekcji. Wywoływanie w przestrzeniach roboczych stojaków ciśnienia odpowiadającego sile w stojakach o wartości większej od wartości siły F_o – równoważącej obciążenie statyczne wyrobiska – powoduje, że w przypadku dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję maksymalna wartość siły w stojakach rośnie proporcjonalnie do siły $F_{st,p}$, a tempo przyrostu siły w stojakach jest znacznie większe w porównaniu z wartościami $w_{F,n}$ charakteryzującymi zmiany siły w stojakach zarejestrowane w warunkach poprawnej współpracy obudowy zmechanizowanej. Fakt ten można potraktować jako dodatkowe uzasadnienie konieczności starannego doboru wartości ciśnienia wstępnego i ciśnienia roboczego w stojakach do warunków górniczo-geologicznych panujących w danym wyrobisku.

Analizując gęstości widmowe mocy sygnałów siły, zarejestrowane podczas dynamicznego oddziaływania górotworu zarówno na stropnicę, jak i na spągnice sekcji, stwierdzono, że charakteryzuje je jedno wyraźne maksimum występujące w paśmie częstości 24,5 ÷ 73,5 rad·s^{-1}. Maksimum gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach występuje więc przy częstości mniejszej od pierwszej częstości własnej sekcji obudowy zmechanizowanej. Wynika stąd, że w funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego również dominują składowe o częstości 0 ÷ 74 rad·s^{-1}. Wniosek powyższy jest zbieżny z wynikami pomiarów drgań stropu za pomocą konwergometru dynamicznego [50].

Na obecnym etapie badań nie jest możliwe sformułowanie ogólnych wniosków odnośnie do związków pomiędzy parametrami K_d i $w_{F,n}$, charakteryzującymi zmiany siły w stojaku, a czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji. Stwierdzenie powyższe dotyczy szczególnie tych przypadków, kiedy dynamiczne oddziaływanie górotworu powoduje działanie obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji obudowy zmechanizowanej. Analiza wyników pomiarów sił w stojakach spowodowanych takimi właśnie przypadkami obciążenia dynamicznego wskazuje na potrzebę przeprowadzania dalszych pomiarów obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem górotworu, szczególnie w tych wyrobiskach zagrożonych tąpaniami, które prowadzone są po spągu węglowym.

Korzystając z zarejestrowanych przebiegów czasowych siły w stojakach oszacowano energię sprężystą przenoszoną przez stojaki podczas obciążenia dynamicznego sekcji oraz przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie charakteryzujące zaciskanie wyrobiska w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Porównując energię sprężystą przejętą przez stojaki z energią fali sejsmicznej działającej na sekcję stwierdzono, że dla większości zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji energia sprężysta przejęta przez stojaki jest ponad 30-krotnie większa od energii fali sejsmicznej działającej na po-

wierzchnię stropnicy. Wynika stąd, że źródłem energii działającej na sekcję nie jest sama fala sejsmiczna, lecz zmiany w stropie bezpośrednim (przemieszczenia bloków skalnych tworzących górotwór naruszony, powstanie nowych linii spękań itp.), spowodowane przejściem fali sejsmicznej przez górotwór naruszony lub wywołujące falę sejsmiczną.

W przypadku obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu granice przedziałów ufności (wyznaczone na poziomie ufności 90%) otaczających wartości średnie parametrów charakteryzujących ruch stropnicy względem spągnicy wynoszą:
- w przypadku przemieszczenia – 0,6 ÷ 1,2 mm,
- w przypadku prędkości – 14,9 ÷ 43,8 $mm \cdot s^{-1}$,
- w przypadku przyspieszenia – 0,25 ÷ 3,69 $m \cdot s^{-2}$.

W przypadku obciążenia dynamicznego sekcji działającego od spągu, wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w ruchu stropnicy względem spągnicy mają znacznie większe wartości od podanych powyżej. Korzystając z dotychczasowych pomiarów obciążeń tego rodzaju, można podać jedynie wyniki obliczeń dla pojedynczych serii pomiarowych. Maksymalne wartości tak oszacowanych parametrów wynoszą:
- w przypadku przemieszczenia – 4,6 mm,
- w przypadku prędkości – 6,0 $m \cdot s^{-1}$,
- w przypadku przyspieszenia – 101,0 $m \cdot s^{-2}$.

Pomiary siły w stojakach oraz przyspieszenia stropnicy wykorzystano również do identyfikacji parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. Korzystając z zasady zachowania energii mechanicznej, zapisanej dla sekcji rozpartej w wyrobisku, oszacowano masę m_2 bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. W przypadku obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu, stwierdzono, przyjmując poziom ufności 90%, że wartość średnia masy m_2 mieści się w przedziale 5,7 ÷ 11,7 t. Analogiczny przedział ufności wartości średniej masy bryły stropowej działającej na sekcję w przypadku obciążenia dynamicznego od spągu wynosi: 4,8 ÷ 41,5 t.

Analiza modeli autoregresyjnych sygnału przyspieszenia stropnicy umożliwiła wyznaczenie parametrów modalnych sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku i poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. Metodę wyznaczania częstości drgań własnych tłumionych i współczynników tłumienia przedstawiono w rozdziale 6.3.2. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 6.17. Rodzaj dynamicznego obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej wpływa na liczbę zidentyfikowanych modów dynamicznych oraz wartości częstości własnych i współczynników tłumienia. Niewielka liczba zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji przyłożonym do spągnic sprawia jednak, że powyższego stwierdzenia nie można traktować jako wniosku o charakterze ogólnym. Przeanalizowanie większej liczby zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia stropnicy prawdopodobnie doprowadziłoby do zawężenia przedziałów ufności otaczających wartości średnie parametrów modalnych sekcji.

7. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE SEKCJI OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, traktowane jako funkcja losowa, są gęstość widmowa mocy tego obciążenia oraz jego wariancja. Z zależności (4.13) i (4.27) wynika, że wyznaczenie gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji wymaga obliczenia gęstości widmowej mocy siły w stojakach oraz transmitancji modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu.

Spośród wielkości fizycznych, od których zależą parametry modelu sekcji obudowy zmechanizowanej, jedynie zredukowana masa sekcji nie jest określana na podstawie wyników pomiarów siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy wykonanych w wyrobisku. Wyniki obliczeń zredukowanej masy sekcji zestawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1

Zestawienie wyników obliczeń masy zredukowanej sekcji obudowy zmechanizowanej

Typ sekcji	Wysokość sekcji [m]	Masa sekcji [t]	
		zredukowana do środka masy stropnicy	zredukowana do środka masy spągnicy
FAZOS 15/31-Oz	2,13	5,40	3,80
	2,40	5,57	3,86
	2,65	5,67	3,96
FAZOS 12/23-Oz	2,23	5,55	3,73

Pozostałe wielkości fizyczne wpływające na wartość parametrów modelu, a tym samym również na wartość jego transmitancji widmowej, są wyznaczane drogą pomiarów wykonywanych w wyrobisku. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczono granice przedziałów ufności otaczających wartość średnią badanej wielkości fizycznej. Uwzględniając zmienność wartości mierzonych wielkości fizycznych oraz wartość modułu transmitancji widmowej modelu, określone przez odpowiednie granice przedziału ufności, wyznaczono w oparciu o zależności (4.36) i (4.49) zmianę wartości gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji.

Określono w ten sposób wpływ zmiany wartości wielkości fizycznych wyznaczanych drogą pomiarów dołowych na wartość modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej i gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji.

7.1. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowych rozpatrywanych modeli sekcji obudowy zmechanizowanej

Parametrami określanymi w wyniku pomiarów wykonywanych w wyrobisku eksploatacyjnym, a niezbędnymi do wyznaczenia transmitancji widmowej modelu sekcji, są:

m_2 – masa bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu,

δ_1, δ_2 – współczynniki tłumienia odniesione do pierwszej i drugiej częstości własnej sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku,

$\omega_{0,2}$ – druga częstość własna sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku.

Przyjmując poziom ufności 90% wyznaczono przedziały ufności, otaczające wartość średnią każdego z wyżej wymienionych parametrów. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 6.14 i 6.17. Dokonując analizy wrażliwościowej transmitancji modelu przyjęto, że wartości parametrów m_2, δ_1, δ_2 i $\omega_{0,2}$ zmieniają się w zakresie określonym przez granice przedziału ufności wartości średniej rozpatrywanego parametru.

7.1.1. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu

Przedziały zmienności wartości parametrów wpływających na transmitancję modelu sekcji obudowy zmechanizowanej, przyjęte w obliczeniach, zestawiono w tabeli 7.2.

Na rysunkach 7.1 - 7.6 przedstawiono wykresy ilustrujące wpływ poszczególnych rozpatrywanych parametrów na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej.

Większość parametrów wpływających na wartość modułu transmitancji wyznaczono analizując wyniki pomiarów wykonanych w wyrobisku. W związku z powyższym przyjęto, że wartości modułu transmitancji widmowej spełniające warunek:

$$\Phi_{1,z}(\omega) < 0{,}03\,(\Phi_{1,z}(\omega))_{max} \tag{7.1}$$

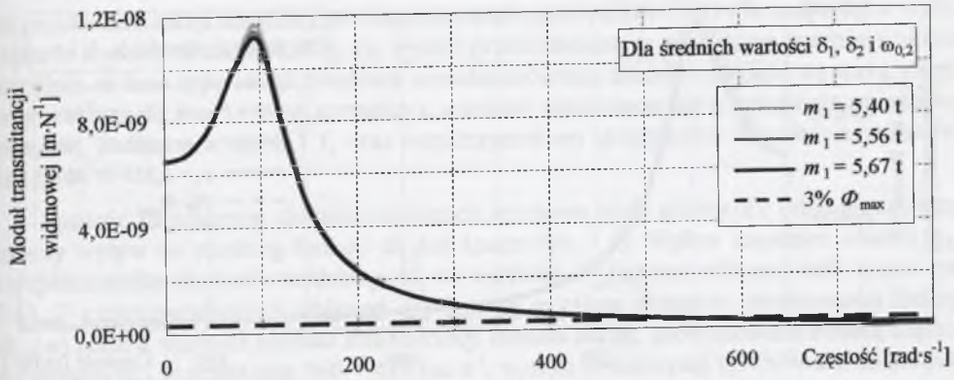
są mało wiarygodne i z tego względu należy ograniczyć obszar oznaczoności funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$. Z wykresów funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$ pokazanych na rysunkach 7.1, 7.3-7.5 wynika, że warunek (7.1) nie jest spełniony dla $\omega < 400 \div 600$ rad·s^{-1}. Pogrubioną przerywaną linią oznaczono na wyżej wymienionych rysunkach prostą o równaniu:

$$\Phi_{1,z}(\omega) = 0{,}03\,(\Phi_{1,z}(\omega))_{max} \tag{7.2}$$

Tabela 7.2

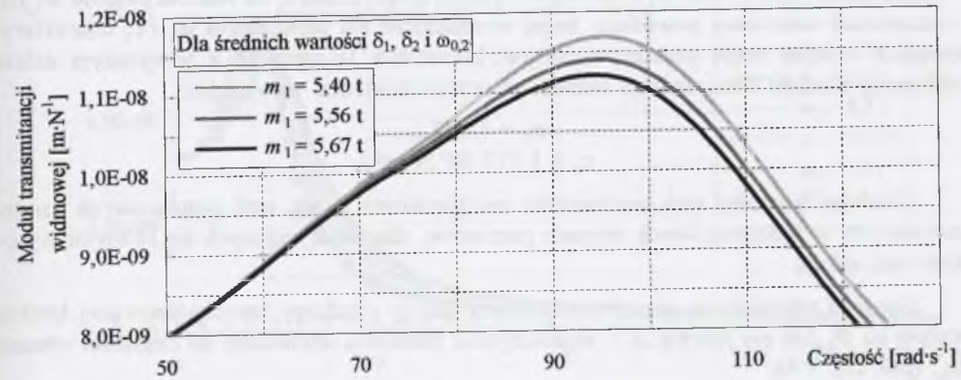
Zestawienie przedziałów zmienności parametrów wpływających na wartość transmitancji modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu

Parametr	Ozn.	Wymiar	Wartość parametru przyjęta w obliczeniach		
			Minimalna	Średnia	Maksymalna
Zredukowana masa sekcji	m_1	[t]	5,40	5,56	5,67
Masa bryły stropowej	m_2	[t]	5,00	8,50	12,00
Współczynnik tłumienia odniesiony do częstości własnej	δ_1	[rad·s^{-1}]	-100	-85	-70
	δ_2		-120	-90	-60
Częstość własna	$\omega_{0,2}$	[rad·s^{-1}]	360	385	410



Rys. 7.1. Wpływ zredukowanej masy sekcji na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej

Fig. 7.1. Effect of the reduced mass of a support unit on the modulus of transmittance $\Phi_{1,z}(\omega)$



Rys. 7.2. Wpływ zredukowanej masy sekcji na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej – otoczenie maksimum funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$

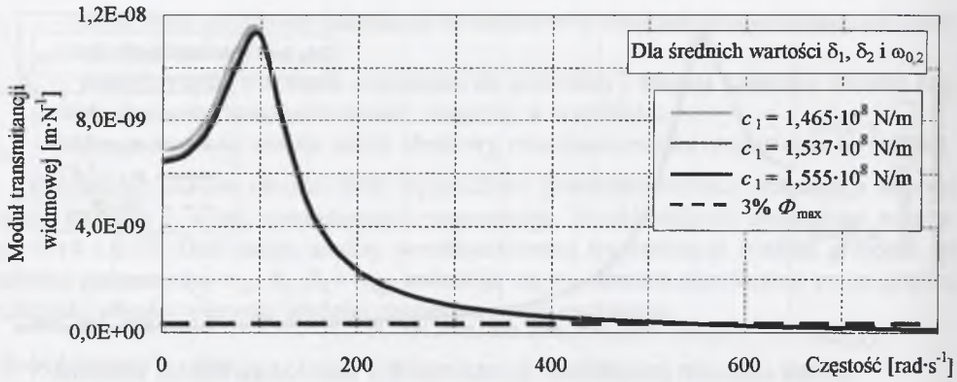
Fig. 7.2. Effect of the reduced mass of a support unit on the modulus of transmittance $\Phi_{1,z}(\omega)$ – neighbourhood of the maximum of a function $\Phi_{1,z}(\omega)$

Funkcję $\Phi_{1,z}(\omega)$ charakteryzuje jedno wyraźne maksimum występujące przy częstości około 100 rad·s^{-1}.

Zmiana masy sekcji zredukowanej do środka masy stropnicy, w przedziale podanym w tabeli 7.1, powoduje zauważalną zmianę wartości transmitancji jedynie w otoczeniu maksimum tej funkcji (rys. 7.1 i 7.2). Współczynnik sprężystości c_1 zależy od kąta pochylenia stojaków i od wysokości słupa medium roboczego pod tłokiem. Wielkości te zależą od wysokości sekcji. W przypadku stojaków o średnicy cylindra 200 mm stosowanych w sekcjach obudowy FAZOS 12/28-Oz i FAZOS 15/31-Oz zmiana wysokości wyrobiska w zakresie podanym w tabeli 7.1 powoduje zmianę współczynnika sprężystości c_1 w przedziale:

$$1{,}465 \cdot 10^8\ \mathrm{N \cdot m^{-1}} < c_1 < 1{,}555 \cdot 10^8\ \mathrm{N \cdot m^{-1}} \tag{7.3}$$

Nieznaczny wpływ zmiany współczynnika sprężystości c_1 na wartość $\Phi_{1,z}(\omega)$ widoczny jest jedynie w przedziale częstości $0 \div 100$ rad·s^{-1} (rys. 7.3).



Rys. 7.3. Wpływ współczynnika sprężystości c_1 na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej

Fig. 7.3. Effect of the coefficient of elasticity c_1 on the modulus of transmittance $\Phi_{1,z}(\omega)$

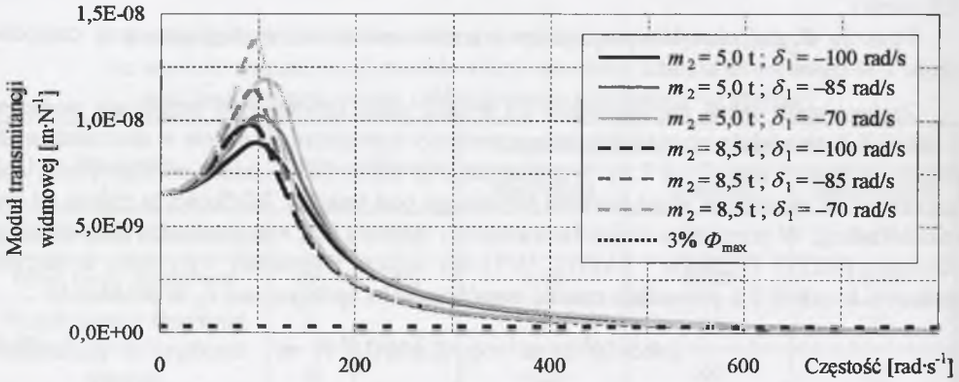
Niewielki wpływ masy m_1 oraz współczynnika sprężystości c_1 na wartość modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej powoduje, że jej wyznaczanie dla parametrów m_1 i c_1 charakteryzujących kolejne etapy pomiarów nie jest konieczne. W związku z powyższym dalsze obliczenia modułu transmitancji widmowej przeprowadzono przyjmując:

$$m_1 = 5{,}557 \text{ t},$$
$$c_1 = 1{,}537 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}.$$

Ustalając wartości tych parametrów uwzględniono liczbę serii pomiarowych zarejestrowanych w poszczególnych etapach pomiarów, charakteryzujących się różnymi wysokościami sekcji.

Spośród parametrów charakteryzujących sekcję obudowy zmechanizowanej istotny wpływ na $\Phi_{1,z}(\omega)$ ma jedynie δ_1 – współczynnik tłumienia odniesiony do częstości własnej $\omega_{0,1}$ (por. rys. 7.4).

Analiza wpływu parametrów m_1, c_1 i δ_1 - zależnych od postaci konstrukcyjnej sekcji oraz od wysokości wyrobiska, upoważnia do stwierdzenia, iż jakkolwiek analizę wrażliwościową transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej przeprowadzono

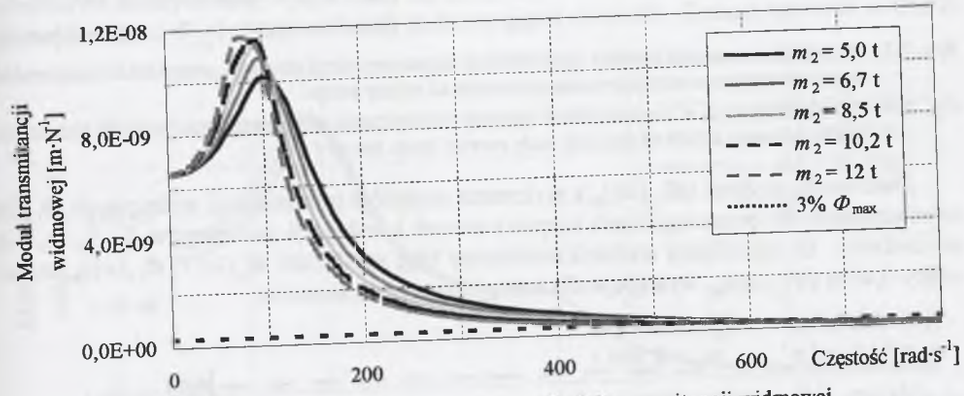


Rys. 7.4. Wpływ współczynnika tłumienia δ_1 na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej

Fig. 7.4. Effect of the coefficient of damping δ_1 on the modulus of transmittance $\Phi_{1,z}(\omega)$

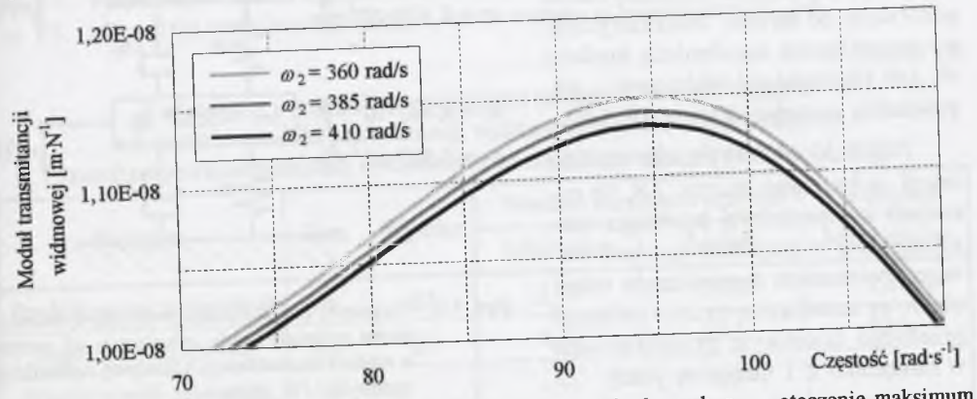
na przykładzie sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS 15/31-Oz rozpartej w wyrobisku o wysokości około 2,4 m, to wyniki przedstawione w niniejszym rozdziale można uogólnić na inne typy sekcji obudowy zmechanizowanej charakteryzujące się masą sekcji, zredukowaną do środka masy stropnicy o wartości mieszczącej się w przedziale zmienności masy m_1, podanym w tabeli 7.1, oraz współczynnikiem sprężystości c_1 spełniającym warunek (7.3).

Spośród parametrów charakteryzujących stropową bryłę górotworu tylko jej masa ma istotny wpływ na przebieg funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$ (patrz rys. 7.5). Wpływ częstości własnej $\omega_{0,2}$ i współczynnika tłumienia modalnego δ_2 na wartości $\Phi_{1,z}(\omega)$ jest znikomo mały (patrz rys. 7.6). Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w całym obszarze oznaczoności funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$ zmiana wartości modułu transmitancji modelu sekcji, spowodowana zmianą częstości własnej $\omega_{0,2}$ w przedziale 360 ÷ 410 rad·s⁻¹, wynosi co najwyżej 1,94% wartości modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej o współczynniku sztywności c_2 odpowiadającym $\omega_{0,2}$ = 385 rad·s⁻¹.



Rys. 7.5. Wpływ masy stropowej górotworu m_2 na moduł $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej

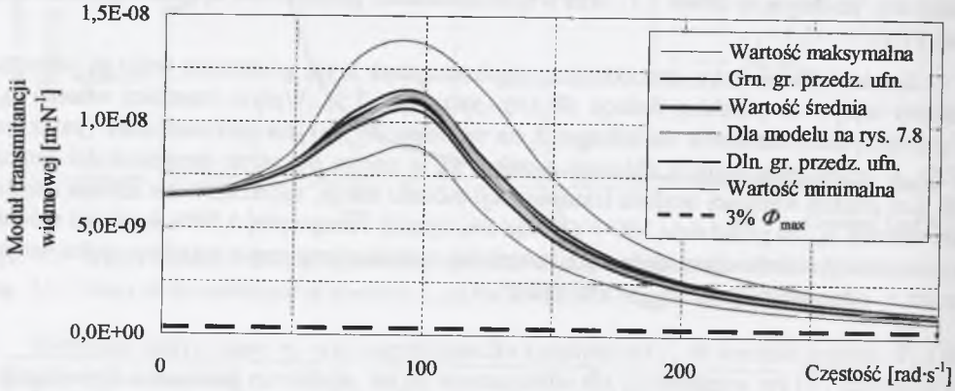
Fig. 7.5. Effect of the roof mass of the rock body m_2 on the modulus of transmittance $\Phi_{1,z}(\omega)$



Rys. 7.6. Fragment wykresu funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$ dla różnych częstości własnych $\omega_{0,2}$ – otoczenie maksimum funkcji $\Phi_{1,z}(\omega)$

Fig. 7.6. Fragment of the graph of the function $\Phi_{1,z}(\omega)$ for different natural frequencies $\omega_{0,2}$ – neighbourhood of the maximum of a function $\Phi_{1,z}(\omega)$

Przedział zmienności modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej wynikający ze zmiany wartości parametrów δ_1, δ_2, m_2 i ω_2 w całym zakresie podanym w tabeli 7.2 przedstawiono na rys. 7.7. Na rys. 7.7 zaznaczono również wykres średnich wartości – $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ oraz granice przedziału ufności dla wartości średniej, zbudowanego na poziomie ufności 90%.



Rys. 7.7. Przedział zmienności modułu transmitancji widmowej sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony stropu

Fig. 7.7. Variation interval of the modulus of spectral transmittance of a powered roof support unit subjected to dynamic action of the rock body exerted from the roof

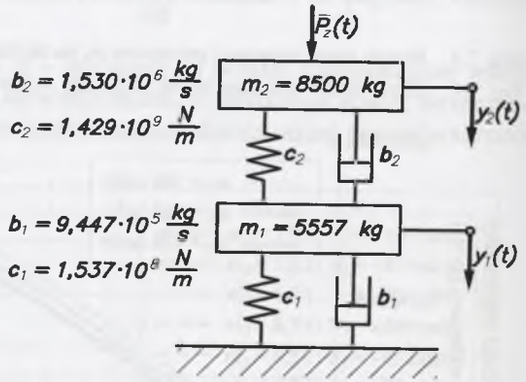
Porównując wykres $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ z wykresem modułów transmitancji widmowych $\Phi_{1,z}(\omega)$ wyznaczonych dla poszczególnych rozpatrywanych kombinacji parametrów δ_1, δ_2, m_2 i ω_2 stwierdzono, że najmniejszy średniokwadratowy błąd zgodności $\Phi_{1,z}(\omega)$ i $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$, stanowiący 0,65% $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$, występuje dla następujących parametrów:

$\delta_1 = -85$ rad·s^{-1} $\quad \delta_2 = -90$ rad·s^{-1}
$\omega_2 = 410$ rad·s^{-1} $\quad m_2 = 8{,}500$ t

Na rys. 7.8 przedstawiono model sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu, charakteryzujący się najlepszą zgodnością modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej z odpowiednią wartością średnią $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$.

Przykład wykorzystania modelu sekcji, pokazanego na rys. 7.8, do symulacji komputerowej przebiegu czasowego siły w stojakach spowodowanego obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej o zadanym przebiegu czasowym przedstawiono w załączniku Z.1 niniejszej pracy.

Stosunkowo wąski przedział ufności otaczający wartość średnią modułu transmitancji widmowej (jego maksymalna szerokość wynosi 16,7% $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ upoważnia do przyjmowania w obliczeniach gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej wartości modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej zmieniających się w granicach przedziału ufności.



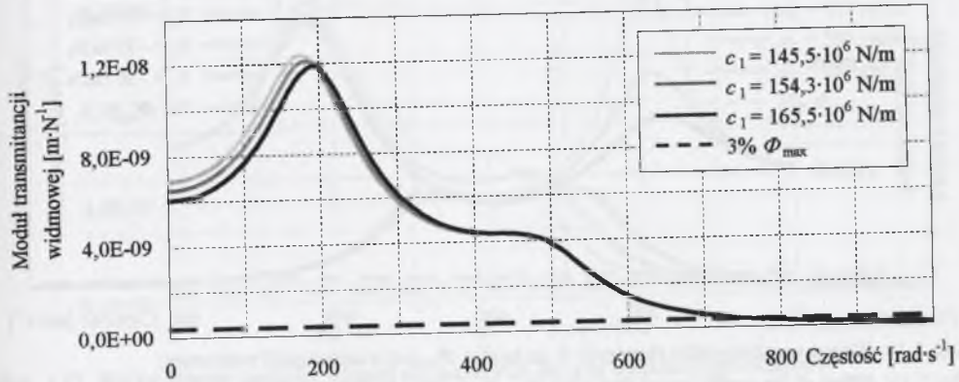
Rys. 7.8. Parametry modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu o module transmitancji widmowej najbardziej zgodnym z $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$

Fig. 7.8. Parameters of the model of a support unit subjected to dynamic action of the rock body exerted from the roof with spectral transmittance being the most consistent with $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$

7.1.2. Analiza wrażliwościowa transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu

W tabeli 7.3 zestawiono przedziały zmienności wartości parametrów rozpatrywanych w analizie wrażliwościowej transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony spągu. Wpływ wartości parametrów zestawionych w tabeli 7.3 na moduł $\Phi_{12,s}(\omega)$ transmitancji widmowej modelu przedstawiono na rysunkach 7.9 - 7.13.

Podobnie jak w przypadku modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony stropu, wpływ masy m_1 sekcji zredukowanej do środka masy spągnicy na wartość modułu $\Phi_{12,s}(\omega)$ transmitancji widmowej jest niewielki. Zmiana wartości zreduko-



Rys. 7.9. Wpływ współczynnika sprężystości c_1 na moduł $\Phi_{12,s}(\omega)$ transmitancji widmowej

Fig. 7.9. Effect of the coefficient of elasticity c_1 on the modulus of transmittance $\Phi_{12,s}(\omega)$

Tabela 7.3

Zestawienie przedziałów zmienności parametrów wpływających na wartość modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu

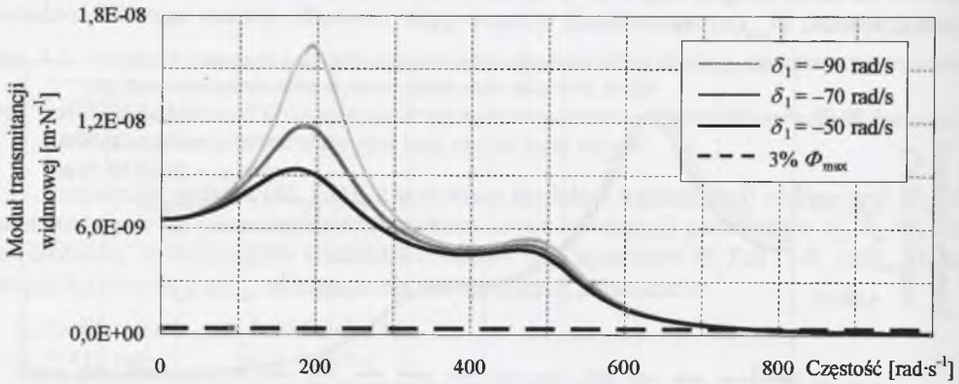
Parametr	Ozn.	Wymiar	Wartość parametru przyjęta w obliczeniach		
			Minimalna	Średnia	Maksymalna
Zredukowana masa sekcji	m_1	[t]	3,73	3,79	3,86
Masa bryły stropowej	m_2	[t]	5,0	23,5	42,0
Współczynnik tłumienia odniesiony do częstości własnej	δ_1	[rad·s^{-1}]	-50	-70	-90
	δ_2		-30	-50	-70
Częstość własna	$\omega_{0,2}$	[rad·s^{-1}]	450	500	550

wanej masy sekcji w przedziale podanym w tabeli 7.3 powoduje zmianę modułu transmitancji widmowej modelu wynoszącej w całym obszarze oznaczoności funkcji $\Phi_{12,f}(\omega)$ co najwyżej 5% wartości modułu transmitancji widmowej, obliczonego dla m_1 = 3,79 t. Również zmiana współczynnika sprężystości – c_1 powoduje zauważalne zmiany wartości $\Phi_{12,f}(\omega)$ jedynie w paśmie częstości 0 ÷ 200 rad·s^{-1}. Niewielki wpływ masy m_1 oraz współczynnika sprężystości c_1 na wartość $\Phi_{12,f}(\omega)$ upoważnia do przeprowadzenia dalszych obliczeń dla ustalonych wartości tych parametrów, wynoszących:

$$m_1 = 3{,}79 \text{ t},$$
$$c_1 = 1{,}543 \cdot 10^8 \text{ N·m}^{-1}.$$

Ustalając wartości tych parametrów, podobnie jak w przypadku obliczeń omawianych w rozdziale 7.1.1, uwzględniono liczbę serii pomiarowych zarejestrowanych w poszczególnych etapach pomiarów charakteryzujących się różnymi wysokościami sekcji.

Spośród parametrów charakteryzujących sekcję obudowy zmechanizowanej największy wpływ na wartość $\Phi_{12,f}(\omega)$ ma współczynnik tłumienia δ_1 (rys. 7.10).

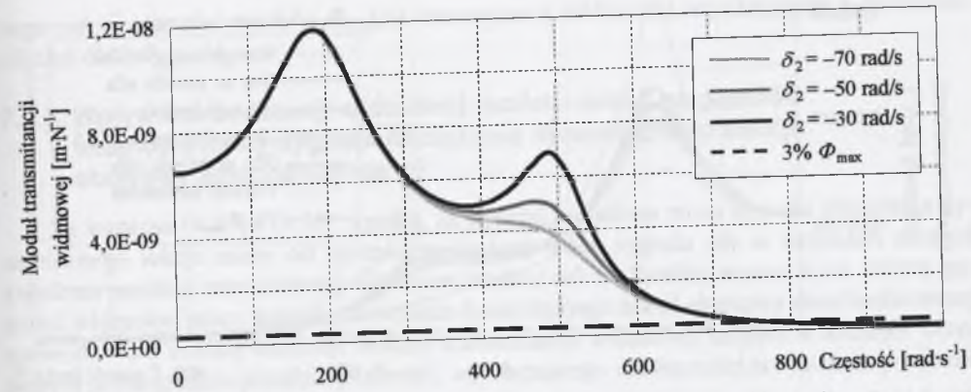


Rys. 7.10. Wpływ współczynnika tłumienia δ_1 na moduł $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej
Fig. 7.10. Effect of the coefficient of damping δ_1 on the modulus of transmittance $\Phi_{12,f}(\omega)$

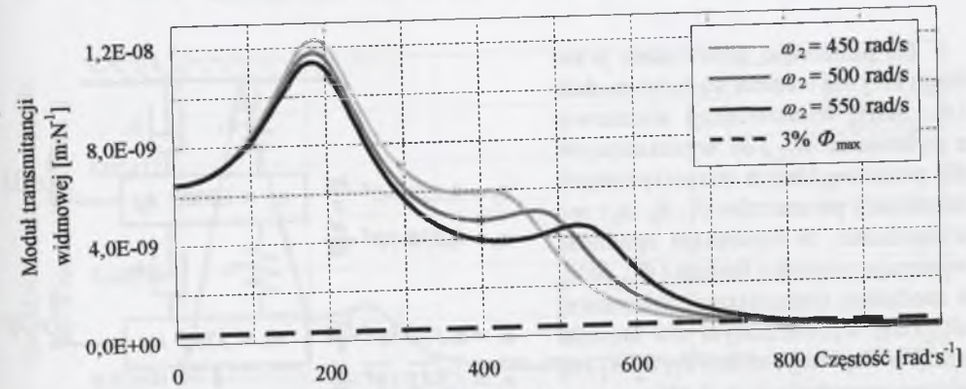
Na rysunkach 7.11-7.13 przedstawiono wpływ parametrów charakteryzujących stropową bryłę górotworu naruszonego na wartość $\Phi_{12,f}(\omega)$.

W odróżnieniu od modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej analizowanego w poprzednim rozdziale, zmiany wartości $\Phi_{12,f}(\omega)$ spowodowane zmianami m_2, δ_2 i ω_2 zauważalne są nie tylko w otoczeniu wartości maksymalnej $(\Phi_{12,f}(\omega))_{max}$, lecz również w paśmie częstości 250 rad·s^{-1} ≤ ω ≤ 500 rad·s^{-1}. Z wykresów pokazanych na rys. 7.13 wynika, że szczególnie istotny wpływ na zmianę modułu transmitancji ma zmiana masy stropowej bryły górotworu w przedziale 5 t ≤ m_2 ≤ 23,5 t.

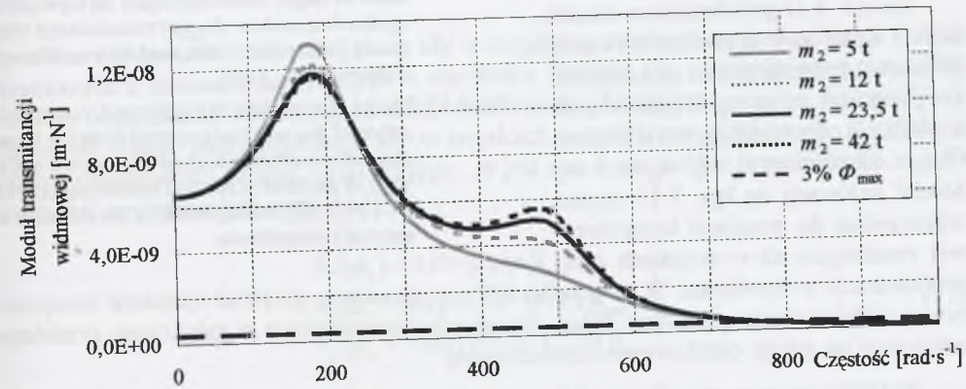
Na rys. 7.14 przedstawiono przedział zmienności modułu $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej układu odpowiadający zmianie parametrów δ_1, δ_2, ω_2 i m_2 w zakresie ujętym w tabeli 7.3. Zakładając, że $\Phi_{12,f}(\omega)$, wyznaczone dla tej samej częstości ω, są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym, obliczono wartość średnią modułu $(\Phi_{12,s}(\omega))_{śr}$ transmitancji widmowej oraz granice przedziału ufności dla wartości średniej, zbudowane na poziomie ufności 90%. Wartości średnie transmitancji widmowej oraz granice przedziału ufności dla $(\Phi_{12,s}(\omega))_{śr}$, wyznaczone dla poszczególnych częstości ω zaznaczono na rys. 7.14.



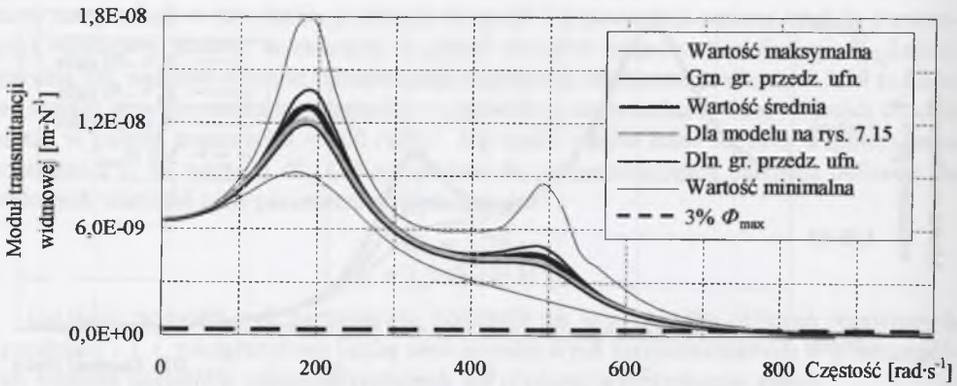
Rys. 7.11. Wpływ współczynnika tłumienia δ_2 na moduł $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej
Fig. 7.11. Effect of the coefficient of elasticity δ_2 on the modulus of transmittance $\Phi_{12,f}(\omega)$



Rys. 7.12. Wpływ drugiej częstości własnej $\omega_{0,2}$ na moduł $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej
Fig. 7.12. Effect of the second natural frequency $\omega_{0,2}$ on the modulus of transmittance $\Phi_{12,f}(\omega)$



Rys. 7.13. Wpływ masy m_2 bryły stropowej na moduł $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej
Fig. 7.13. Effect of the m_2 mass of roof rock block on the modulus of transmittance $\Phi_{12,f}(\omega)$



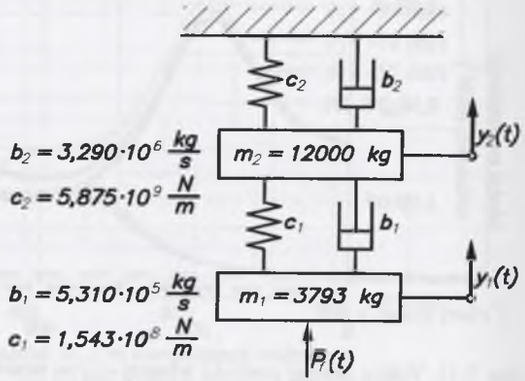
Rys. 7.14. Przedział zmienności modułu $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu

Fig. 7.14. Variation interval of the modulus of transmittance $\Phi_{12,f}(\omega)$ of model of a powered roof support unit subjected to dynamic action of the rock body exerted from the floor

Na podstawie porównania przebiegu krzywej średniej wartości modułu $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$ transmitancji widmowej z wykresami $\Phi_{12,f}(\omega)$ wyznaczonymi dla poszczególnych rozpatrywanych kombinacji parametrów δ_1, δ_2, ω_2 i m_2, stwierdzono, że największa zgodność występuje pomiędzy funkcją $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$ a modułem transmitancji widmowej $\Phi_{12,f}(\omega)$, wyznaczonym dla modelu sekcji o współczynnikach b_1, b_2 m_2 i c_2 wyznaczonych dla (rys. 7.15):

$\delta_1 = -70$ rad·s⁻¹ $\quad \delta_2 = -50$ rad·s⁻¹

$\omega_2 = 500$ rad·s⁻¹ $\quad m_2 = 12{,}0$ t



Rys. 7.15. Model sekcji poddanej obciążeniu dynamicznemu od spągu, charakteryzujący się największą zgodnością modułu $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej z wartością średnią modułu transmitancji widmowej $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$

Fig. 7.15. Model of a support unit subjected to dynamic action of the rock body exerted from the floor, characterized by the highest consistence of the $\Phi_{12,f}(\omega)$ modulus of spectral transmittance with the $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$ average value of the modulus of spectral transmittance

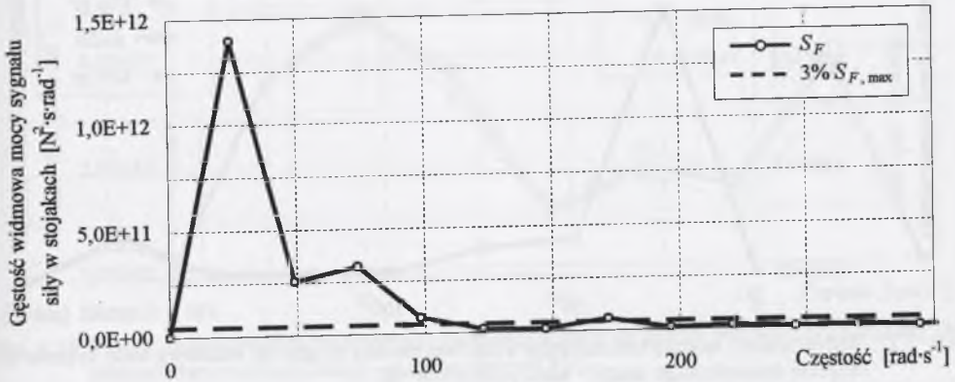
Na rys. 7.15 przedstawiono model sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od strony spągu o współczynnikach odpowiadających wyżej podanym wartościom δ_1, δ_2, ω_2, m_1 i m_2. Model pokazany na rys. 7.15 można wykorzystać do symulacji komputerowej przebiegów sił w stojakach zarejestrowanych w wyrobisku. W załączniku Z.2 przedstawiono przykład symulacji komputerowej oddziaływania od strony spągu obciążenia dynamicznego o założonym przebiegu czasowym na sekcję obudowy zmechanizowanej.

Podobnie jak w przypadku modułu transmitancji modelu rozpatrywanego w rozdziale 7.1.1 stosunkowo wąski przedział ufności dla $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$ pokazany na rys. 7.14 upoważnia do przyjmowania w obliczeniach gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji wartości modułu $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej wynikających z przedziału ufności dla $(\Phi_{12,f}(\omega))_{śr}$.

7.1.3. Wpływ transmitancji widmowej modelu sekcji na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej

Ze wzorów (4.35) i (4.49) wynika, że gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji zależy od gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach oraz od kwadratu modułu transmitancji widmowej modelu sekcji. Poniżej wyznaczono zmiany gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowane zmianą wartości modułu transmitancji widmowej modelu w zakresie określonym przez granice przedziału ufności, wyznaczonego dla wartości średnich na poziomie ufności 90%.

Przykładowo, na rys. 7.16 przedstawiono wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, zarejestrowanego podczas serii pomiarowej nr 1/Z.



Rys. 7.16. Wykres gęstości widmowej mocy siły w stojakach – seria pomiarowa 1/Z

Fig. 7.16. Diagram of spectral density of power of force in legs – measuring series 1/Z

Wartość gęstości widmowej mocy siły w stojakach wyznaczono, korzystając z danych uzyskanych z pomiarów wykonanych w wyrobisku. Dlatego też, podobnie jak w przypadku modułu transmitancji widmowej modelu, ograniczono obszar oznaczoności funkcji $S_F(\omega)$. Ponieważ widmo mocy przebiegu siły w stojakach jest widmem prążkowym, to ustalając obszar oznaczoności funkcji $S_F(\omega)$ przyjęto, że jest ona oznaczona w przedziale $(0\,;\,\omega_k)$ dla częstości ω_k spełniającej warunki (7.4)

$$\left.\begin{aligned} S_F(\omega_k) &< 0{,}03\cdot(S_F(\omega))_{max} \\ S_F(\omega_k+\Delta\omega) &< 0{,}03\cdot(S_F(\omega))_{max} \\ S_F(\omega_k+2\,\Delta\omega) &< 0{,}03\cdot(S_F(\omega))_{max} \end{aligned}\right\} \tag{7.4}$$

gdzie:

$\Delta\omega$ – rozdzielczość gęstości widmowej mocy sygnału.

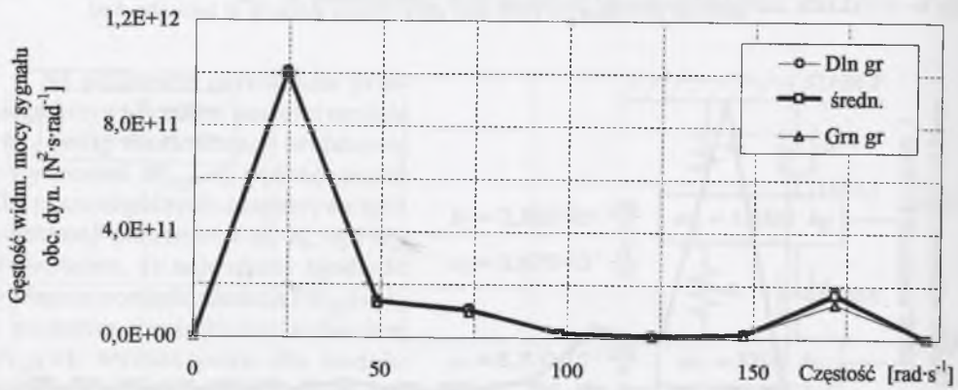
W przypadku gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach przedstawionej na rys. 7.16 $\Delta\omega = 24{,}54$ rad·s^{-1}, natomiast obszar oznaczoności funkcji $S_F(\omega)$ określa nierówność:

$$0 \le \omega \le \omega_k = 196\ \mathrm{rad \cdot s^{-1}} \tag{7.5}$$

Na rysunkach przedstawiających wykresy gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach zaznaczono pogrubioną przerywaną linią prostą o równaniu:

$$S_F(\omega) = 0{,}03 \cdot \left(S_F(\omega)\right)_{\max} \tag{7.6}$$

Na rys. 7.17 przedstawiono wyniki obliczeń gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, powodującego zmiany siły w stojakach, o gęstości widmowej mocy sygnału przedstawionej na rys. 7.16. W obliczeniach przyjęto wartości modułu transmitancji widmowej $\Phi_{1,z}(\omega)$ równe $(\Phi_{1,z}(\omega))_{gr}$ oraz równe dolnej i górnej granicy przedziału ufności wartości średniej modułu transmitancji widmowej.



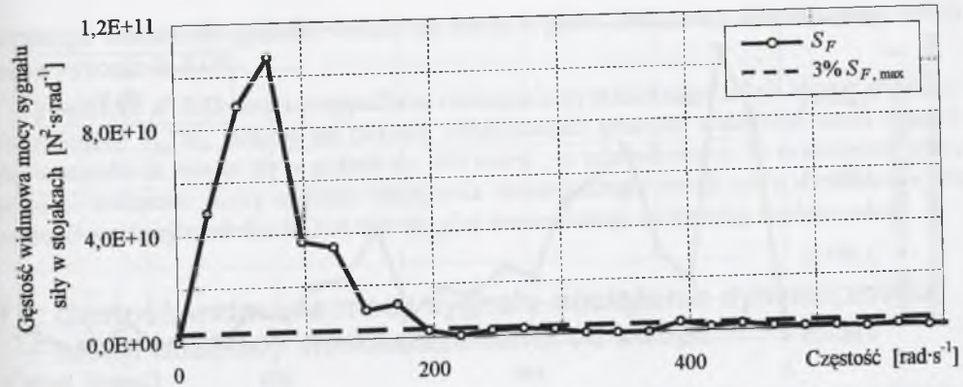
Rys. 7.17. Wpływ zmiany modułu transmitancji widmowej modelu na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji – seria pomiarowa 1/Z

Fig. 7.17. Effect of the variation of transmittance of a model on power spectral density of dynamic load acting on a support unit – measuring series 1/Z

Zmiana modułu transmitancji widmowej modelu $\Phi_{1,z}(\omega)$, w zakresie wyznaczonym przez granice przedziału ufności $(\Phi_{1,z}(\omega))_{gr}$ pokazane na rys. 7.7, nieznacznie wpływa na wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji.

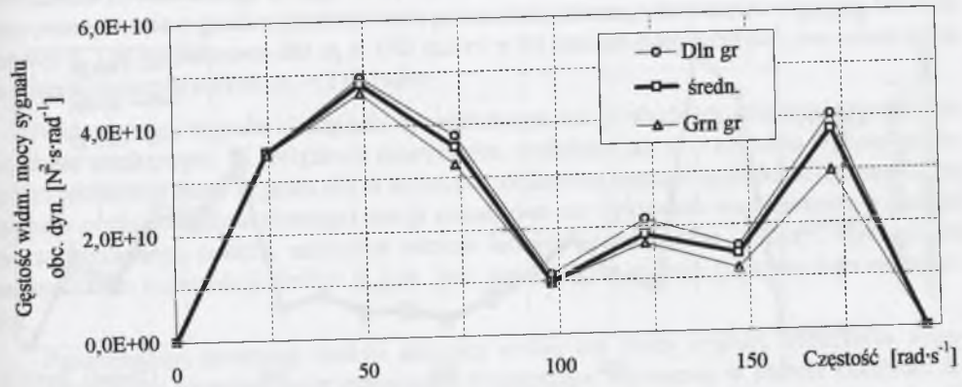
Wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach zarejestrowanej w serii pomiarowej 34/Z (rys. 7.18) charakteryzuje identyczny obszar oznaczoności funkcji $S_F(\omega)$, ($\omega_k = 196$ rad·s^{-1}). Wpływ zmiany wartości modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ transmitancji widmowej modelu w zakresie wyznaczonym przez granice przedziału ufności na wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia zewnętrznego ilustruje rys. 7.19. W wypadku tej serii pomiarowej wpływ zmiany modułu transmitancji modelu na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego jest wyraźniejszy, szczególnie w paśmie częstości od 100 ÷ 192 rad·s^{-1}.

Wpływ zmiany modułu $\Phi_{12,f}(\omega)$ transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu łupkowego na



Rys. 7.18. Gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach – seria pomiarowa 34/Z

Fig. 7.18. Power spectral density of force in legs – measuring series 34/Z



Rys. 7.19. Wpływ zmiany modułu transmitancji widmowej modelu na gęstość widmową sygnału mocy obciążenia dynamicznego sekcji – seria pomiarowa 34/Z

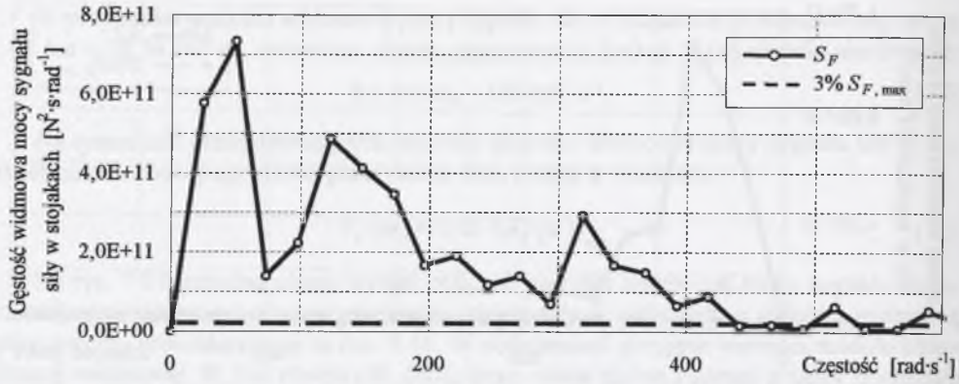
Fig. 7.19. Effect of the variation of transmittance of a model on power spectral density of dynamic load acting on a support unit – measuring series 34/Z

gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od spągu – $S_{Pf}(\omega)$ jest podobny do wpływu zmiany $\Phi_{1,z}(\omega)$ na $S_{Pz}(\omega)$, przedstawionego na rys. 7.17 i 7.19.

Na rys. 7.20 przedstawiono wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, zarejestrowanego podczas serii pomiarowej 3/W. Charakteryzuje go największy obszar oznaczoności funkcji $S_F(\omega)$ spośród wszystkich zarejestrowanych przebiegów zmian siły w stojakach, spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu od spągu. Wykres przedstawiony na rys. 7.20 wyróżnia też znacznie większy odsetek mocy sygnału siły przypadający na częstości powyżej 100 rad·s^{-1}.

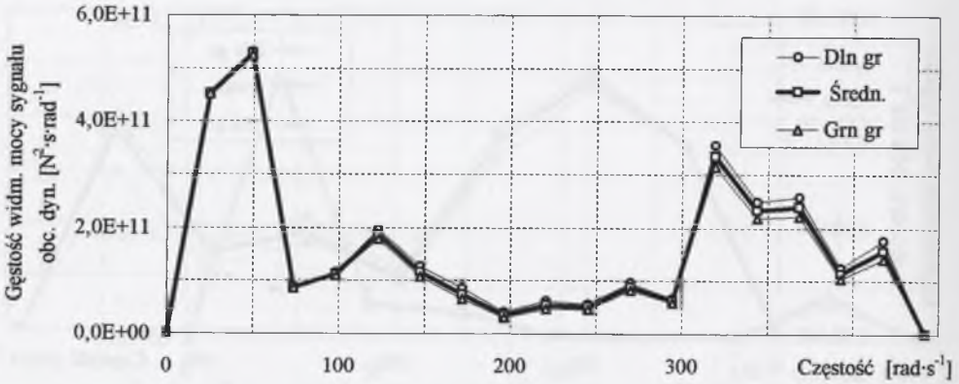
Wykresy gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji w tej serii pomiarowej, wyznaczone dla modułu transmitancji widmowej modelu $\Phi_{12,f}(\omega)$, przyjmującej wartości określone przez granice przedziału ufności, widoczne na rys. 7.14, przedstawiono na rys. 7.21.

Zmiany wartości $\Phi_{12,f}(\omega)$ w zakresie wyznaczonym przez granice przedziału ufności, wyznaczonego, na poziomie ufności 90%, dla wartości średniej modułu transmitancji wid-



Rys. 7.20. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach – seria pomiarowa 3/W

Fig. 7.20. Diagram of power spectral density of force in legs – measuring series 3/W



Rys. 7.21. Wpływ zmiany transmitancji modelu na gęstość widmową mocy obciążenia dynamicznego sekcji – seria pomiarowa 3/W

Fig. 7.21. Effect of the variation of transmittance of a model on power spectral density of dynamic load acting on a support unit – measuring series 3/W

mowej modelu, w paśmie częstości 0 ÷ 300 rad·s^{-1} nie wpływają znacząco na wartość gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji. Dopiero dla częstości większych od 300 rad·s^{-1} zmiany wartości $S_{P_f}(\omega)$, spowodowane zmianą transmitancji widmowej modelu, są wyraźniej widoczne.

Reasumując: zmiana wartości modułów $\Phi_{1,z}(\omega)$ i $\Phi_{12,s}(\omega)$ transmitancji widmowej w zakresie wyznaczonym przez granice przedziału ufności dla wartości średniej, nieznacznie wpływa na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji w paśmie częstości 0 ÷ 100 rad·s^{-1}. Ze wzrostem częstości rośnie wpływ zmiany wartości modułu transmitancji widmowej modelu na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji. Przyjmując w obliczeniach wartości średnie modułów transmitancji widmowej modelu sekcji można lokalne maksima gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od stropu – $S_{P_z}(\omega)$, lub gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od spągu – $S_{P_f}(\omega)$, występujące w paśmie 100 ÷ 200 rad·s^{-1}, wyznaczyć z dokładnością do 15%. W przypadku gdy ω > 300 rad·s^{-1}, dokładność wyznaczania

lokalnego maksimum gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji może wynosić do 31%.

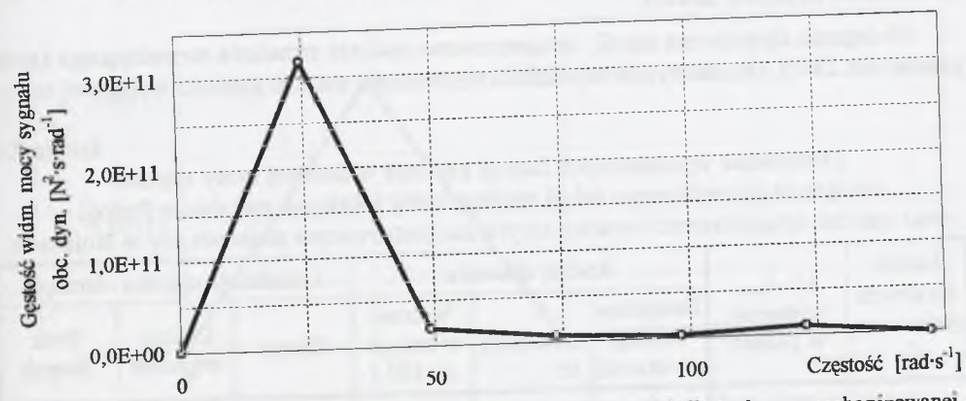
Ponieważ w większości przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obszar oznaczoności funkcji $S_{P_z}(\omega)$, zależny od obszaru oznaczoności gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, mieści się w paśmie do 200 rad·s^{-1}, to zdecydowano, że w niniejszej pracy gęstości widmowe mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji będą wyznaczane dla wartości średniej modułu $\Phi_{1,z}(\omega)$ lub $\Phi_{12,s}(\omega)$ transmitancji widmowej modelu sekcji.

7.2. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od stropu

W przypadku 28 serii pomiarowych, charakteryzujących się dynamicznym oddziaływaniem górotworu od stropu, obszar oznaczoności funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej jest znacznie węższy od pasma przenoszenia sygnałów pomiarowych przez zastosowaną aparaturę pomiarową. Wartość funkcji $S_{P_z}(\omega)$ wyznaczono dla ω_k < 150 rad·s^{-1} w 21 seriach pomiarowych, natomiast tylko w 4 seriach pomiarowych ω_k > 270 rad·s^{-1}.

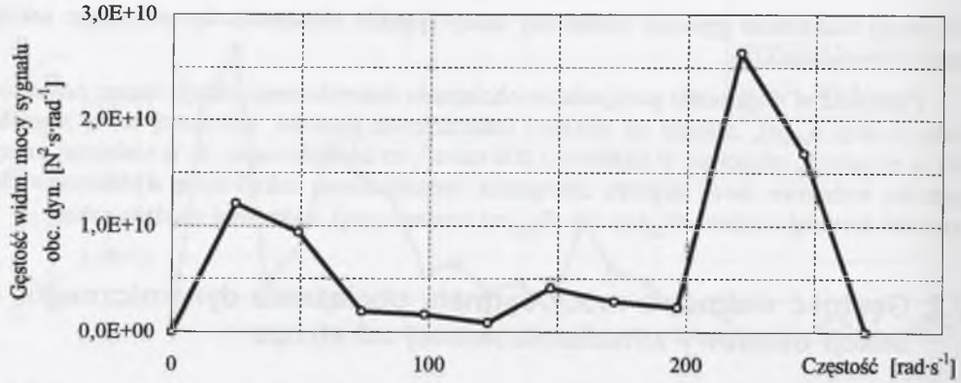
Widmo mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej jest widmem prążkowym. W związku z powyższym, podobnie jak w przypadku wykresów gęstości widmowej mocy sygnału siły w stojakach, obliczoną wartość gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji oznaczono na wykresach wyróżnikiem w postaci nie zaczernionego punktu, natomiast odcinki łączące poszczególne „punkty" wykresu nie są rezultatem interpolacji funkcji $S_{P_z}(\omega)$, lecz mają jedynie na celu poprawę jego czytelności.

Poszczególne przebiegi funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji charakteryzuje maksimum występujące zazwyczaj w paśmie częstości do 75 rad·s^{-1} (rys. 7.22). W przypadku gdy gęstość widmowa mocy sygnału ma większą liczbę wyraźnych maksimów lokalnych (rys. 7.23), to jedno z nich zawsze występuje w paśmie



Rys. 7.22. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej – seria pomiarowa 29/Z

Fig. 7.22. Power spectrum density of dynamic load acting on a powered roof support unit – measuring series 29/Z



Rys. 7.23. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej – seria pomiarowa 15/Z

Fig. 7.23. Power spectrum density of dynamic load acting on a powered roof support unit – measuring series 15/Z

częstości do 75 rad·s^{-1}. W tabeli 7.4 zestawiono informacje dotyczące liczby lokalnych maksimów funkcji $S_{Pz}(w)$ w poszczególnych funkcjach gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji.

Przypadki występowania dwóch lokalnych maksimów funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji są stosunkowo rzadkie. Obciążenie dynamiczne sekcji o takiej postaci widma zarejestrowano głównie podczas strzelań wykonywanych w ścianie.

Ogniska wstrząsów towarzyszących tym przypadkom obciążenia dynamicznego zlokalizowano przeważnie w caliźnie. Jakkolwiek nie wszystkie wykresy gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, zarejestrowane podczas strzelań, charakteryzują dwa lokalne maksima, to zmiana charakteru funkcji $S_{Pz}(\omega)$, w przypadku obciążenia dynamicznego sekcji zarejestrowanego podczas strzelania, może być spowodowana bardziej uporządkowaną, warstwową strukturą górotworu naruszonego nad calizną węglową w porównaniu ze strukturą zawału.

Obciążenie dynamiczne sekcji, zarejestrowane podczas strzelania torpedującego (seria pomiarowa 28/Z), charakteryzuje największa wyznaczona wartość gęstości widmowej mocy.

Tabela 7.4

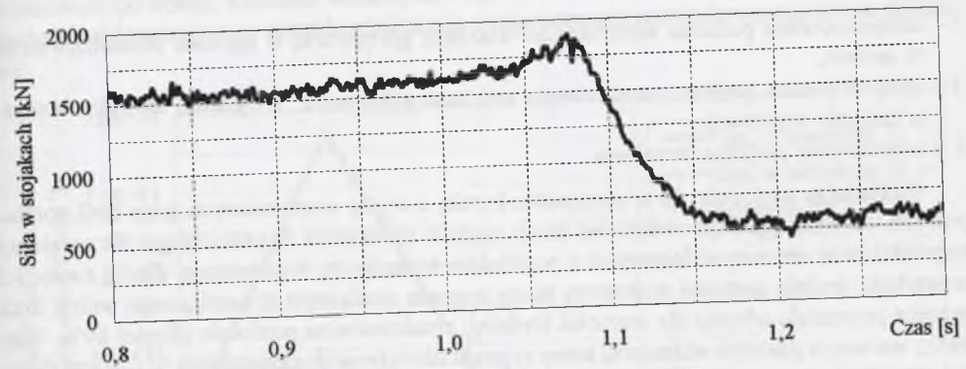
Zestawienie wyznaczonych funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji według liczby lokalnych maksimów funkcji oraz zjawisk dynamicznych towarzyszących zarejestrowanym zmianom siły w stojakach

Liczba lokalnych maksimów S_{Pz}	$(S_{Pz})_{max}$ występuje w paśmie	Rodzaj zjawiska			Lokalizacja ogniska wstrząsu		
		Samoistny wstrząs górotworu	Strzelanie	Wstrząs o energii do 100 J	Zawał	Calizna węglowa	Brak danych
1	ω<70 rad·s^{-1}	11	4	2	6	7	4
2	ω<70 rad·s^{-1}	1	5	2	1	5	2
	ω>70 rad·s^{-1}	2	1	—	1	2	—

Przebieg czasowy zmian sił w stojakach, pokazany na rys. 7.24, cechuje większa wartość początkowej siły statycznej w stojakach od wartości końcowej siły statycznej. Na rys. 7.25 przedstawiono wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej wywołującego zmiany siły w stojakach pokazane na rys. 7.24.

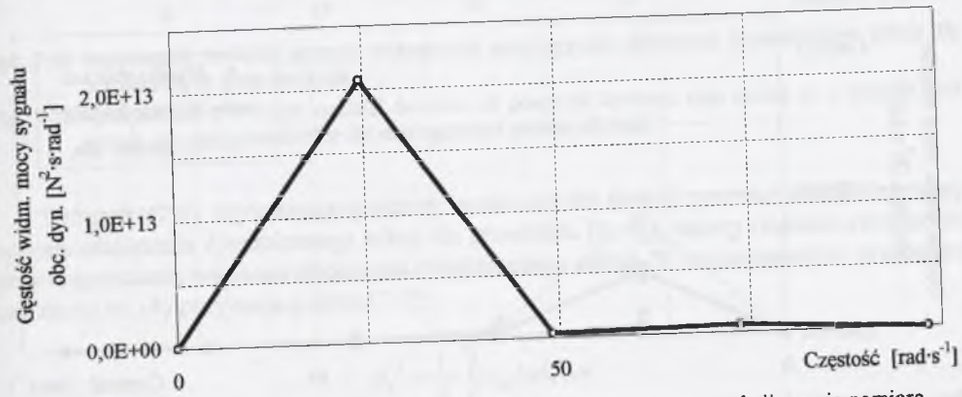
Spośród zmian siły w stojakach spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu od stropu warunek $F_{st,p} < F_{st,k}$ spełniony jest tylko w przypadku dwóch serii pomiarowych – 28/Z i 8/Z. W odróżnieniu od serii pomiarowej 28/Z, zarejestrowanej podczas strzelania, zmianom siły w stojakach zarejestrowanym w serii pomiarowej 8/Z towarzyszył samoistny wstrząs górotworu o energii 6·10^4 J. Ognisko wstrząsu zlokalizowano w zawale w odległości około 38 m od miejsca wykonywania pomiarów. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji podczas serii pomiarowej 8/Z pokazano na rys. 7.26.

Analizując $S_{Pz}(\omega)$ w pozostałych 26 seriach pomiarowych, podczas których obciążenie dynamiczne działało na sekcję od stropu, wyróżniono serie pomiarowe:



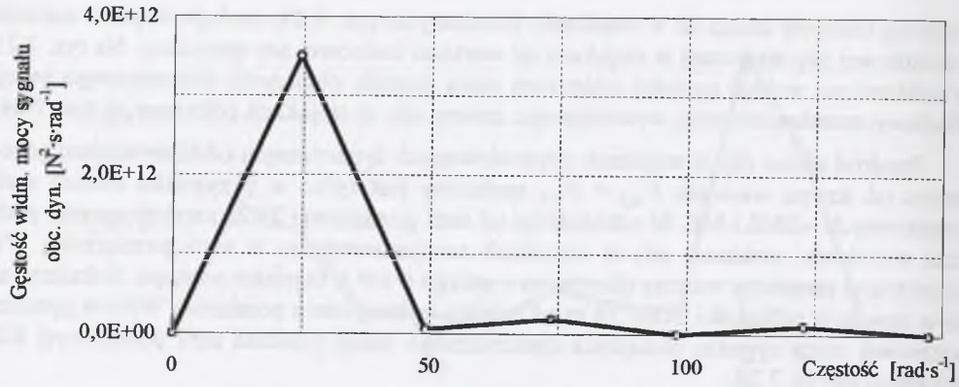
Rys. 7.24. Przebieg czasowy zmian siły w stojakach – seria pomiarowa 28/Z

Fig. 7.24. Time related course of the variation of force in legs – measuring series 28 /Z



Rys. 7.25. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji – seria pomiarowa 28/Z

Fig. 7.25. Diagram of power spectral density of the course of dynamic load acting on a support unit – measuring series 28/Z

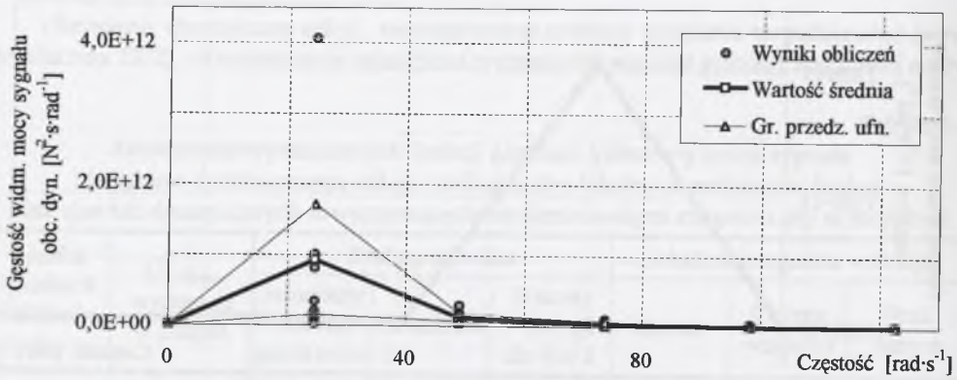


Rys. 7.26. Wykres gęstości widmowej mocy przebiegu obciążenia dynamicznego sekcji – seria pomiarowa 8/Z

Fig. 7.26. Diagram of power spectral density of the course of dynamic load acting on a support unit – measuring series 8/Z

1 – zarejestrowane podczas samoistnego wstrząsu górotworu, o ognisku zlokalizowanym w zawale,
2 – zarejestrowane podczas samoistnego wstrząsu górotworu, o ognisku zlokalizowanym w caliźnie węglowej,
3 – odnotowane podczas strzelania.

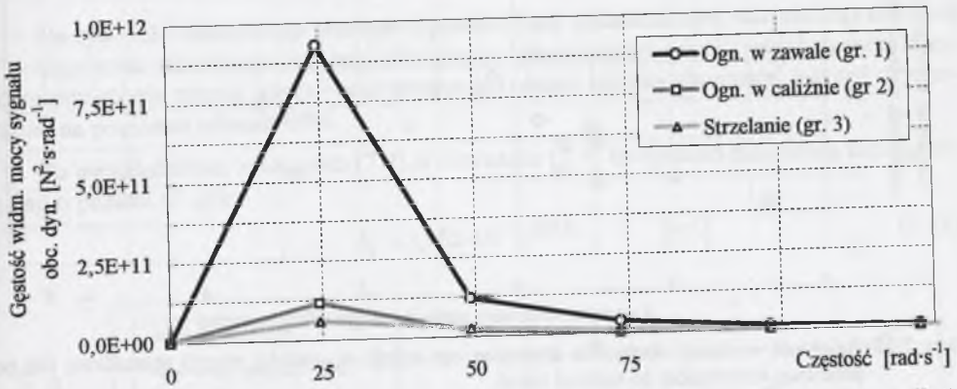
Zakładając następnie, że w przypadku każdej z wyżej wymienionych grup serii pomiarowych wartości gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego dla ustalonej częstości ω są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym, wyznaczono dla tej częstości ω wartość średnią gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji oraz granice przedziału ufności dla wartości średniej, zbudowane na poziomie ufności 80%. Niestety, wariancja gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego $S_{P_z}(\omega)$ jest duża. Na przykład: na rysunku 7.27 przedstawiono wykresy wartości gęstości widmowej $S_{P_z}(\omega)$, obliczonych dla poszczególnych serii pomiarowych, wartości $(S_{P_z})_{śr}$ średniej gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji oraz granice przedziału ufności dla wartości średniej, wyznaczone dla serii pomiarowych zarejestrowanych podczas samoistnego wstrząsu górotworu, o ognisku zlokalizowanym w zawale (grupa 2). Duża wariancja gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego jest spowodowana małą liczbą zarejestrowanych serii pomiarowych, co również uniemożliwia wyróżnienie grup obciążeń dynamicznych charakteryzujących się jednorodnym dynamicznym oddziaływaniem górotworu. Niestety, na obecnym etapie badań można jedynie stwierdzić, że maksimum gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego występuje przy częstości 24,5 rad·s⁻¹ zarówno dla obciążenia dynamicznego spowodowanego strzelaniem, jak i samoistnymi zjawiskami w górotworze. Wartości średnie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji dla poszczególnych częstości, pokazane na rys. 7.27, są natomiast obarczone dużym błędem.



Rys. 7.27. Wartość średnia gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, w przypadku gdy towarzyszył mu wstrząs górotworu o ognisku zlokalizowanym w zawale

Fig. 7.27. Average value of spectral density of power of dynamic load acting on a support unit when the load was accompanied by a rock bump the focus of which was located in the gob area

Na rys. 7.28 porównano wartości średnie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego charakteryzujące trzy grupy obciążeń dynamicznych sekcji, wyróżnione w niniejszej pracy. W paśmie do 50 rad·s⁻¹ gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, któremu towarzyszył samoistny wstrząs górotworu, jest większa od gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego spowodowanego przez strzelanie.



Rys. 7.28. Porównanie średnich gęstości widmowych mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji dla wyróżnionych grup obciążeń

Fig. 7.28. Comparison of average spectral densities of power of dynamic load acting on a support unit which are characteristic for the distinguished groups of loads

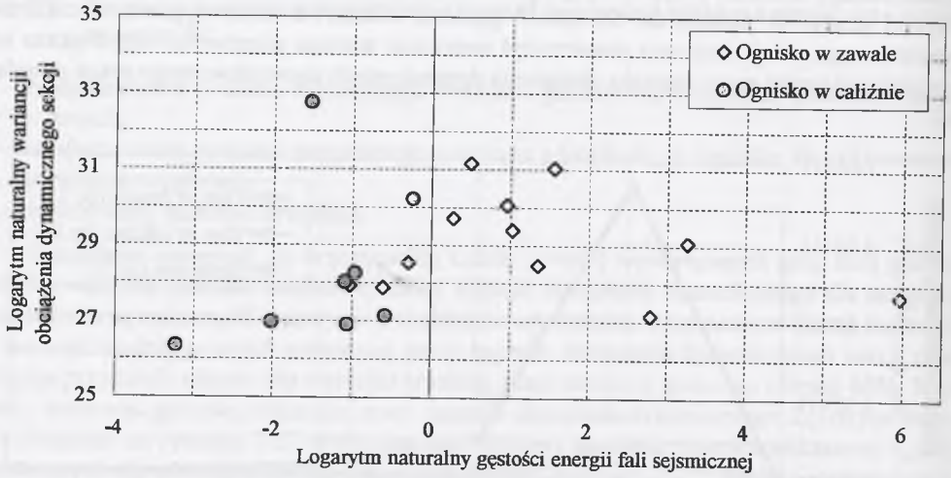
Warunek (7.4), ograniczający obszar oznaczoności funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji do przedziału (0; ω_k), należy również uwzględnić przy wyznaczaniu wariancji obciążenia dynamicznego sekcji. W rozpatrywanym przypadku zależność (4.14) przyjmuje postać (7.7):

$$\delta_z^2 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\omega_k} S_{P_z}(\omega)\, d\omega \tag{7.7}$$

gdzie:
S_{P_z} – gęstość widmowa mocy obciążenia dynamicznego sekcji,
ω_k – granica obszaru oznaczoności funkcji $S_{P_z}(\omega)$.

Wyznaczając wariancję obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej całkowanie gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego wykonano metodą trapezów. Wartości δ_z^2 wyznaczono dla poszczególnych serii pomiarowych, przy założeniu że obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej jest ergodycznym procesem losowym.

W przypadku 28 serii pomiarowych zarejestrowanych podczas dynamicznego oddziaływania górotworu od stropu wartości δ_z^2 zmieniają się w przedziale $3{,}40 \cdot 10^{11}$ N² ÷ $1{,}69 \cdot 10^{14}$ N². Szeroki przedział zmienności wariancji obciążenia dynamicznego sekcji świadczy o niejednorodności dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej, powodującego zarejestrowane zmiany sił w stojakach i zmiany przyspieszenia stropnicy. Na rys. 7.29 ÷ 7.31 przedstawiono obliczone wartości wariancji obciążenia dynamicznego sekcji od stropu, według parametrów charakteryzujących statyczne i dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej.



Rys. 7.29. Zależność wariancji obciążenia dynamicznego sekcji od gęstości energii sejsmicznej fali poprzecznej docierającej do badanej sekcji

Fig. 7.29. Dependence of a variance of dynamic load acting on a support unit upon the energy density of a transverse seismic wave reaching the support unit under testing

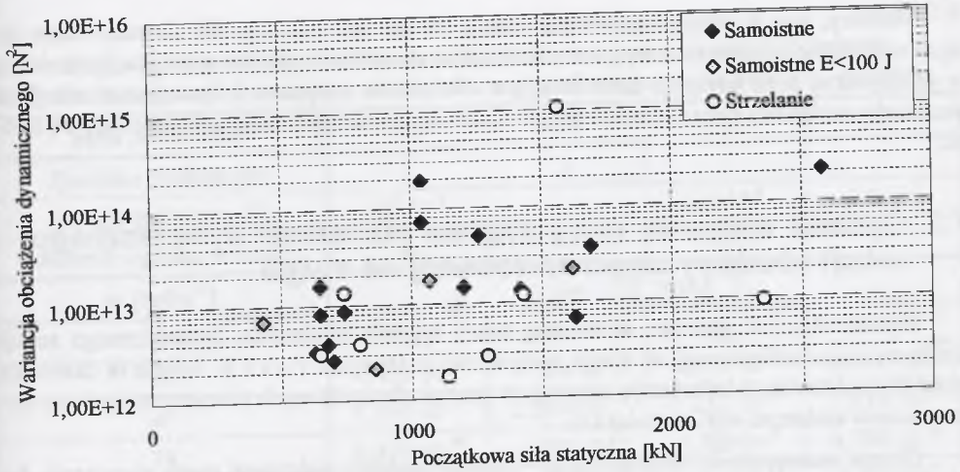
W przypadku serii pomiarowych zarejestrowanych podczas samoistnych wstrząsów górotworu stwierdzono występowanie zależności korelacyjnej pomiędzy współczynnikiem przyrostu obciążenia stojaków a zmienną Y^* określoną wzorem (7.8):

$$Y^* = \ln\left(\delta_z^2\right) \tag{7.8}$$

Charakteryzuje ją współczynnik korelacji wynoszący w rozpatrywanej próbie 0,589.

W przypadku 19-elementowej próby i poziomu ufności 90% krytyczna wartość współczynnika korelacji pomiędzy Y^* i K_d wynosi 0,389. Współczynnik determinacji zmiennych Y^* i K_d wynosi 0,11. Oznacza to, że jedynie w 11% przypadków zmiany wartości zmiennej Y^* można objaśnić zmianą wartości współczynnika przyrostu obciążenia, zgodnie z równaniem (7.9):

$$Y^* = 9{,}28 \cdot K_d + 17{,}4 \tag{7.9}$$



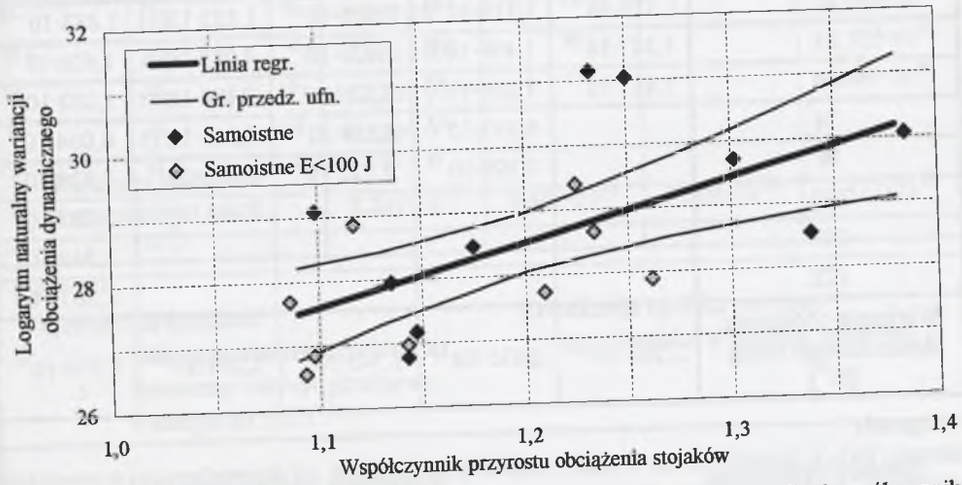
Rys. 7.30. Zależność wariancji obciążenia dynamicznego sekcji od początkowej siły statycznej w stojakach

Fig. 7.30. Dependence of a variance of dynamic load acting on a support unit on the initial static force in legs

Na rys. 7.31 zaznaczono punkty odpowiadające wyznaczonym wartościom zmiennej Y^* – logarytmu naturalnego wariancji obciążenia dynamicznego sekcji i współczynnika przyrostu obciążenia, prostą regresji oraz granice przedziału ufności dla prostej regresji, wyznaczone na poziomie ufności 90%.

Po uwzględnieniu zależności (7.8) w równaniu (7.9) otrzymano nieliniową funkcję regresji o postaci (7.10):

$$\delta_z^2 = 3{,}532 \cdot 10^7 \cdot e^{9{,}28 \cdot K_d}; \qquad [N^2] \tag{7.10}$$



Rys. 7.31. Zależność logarytmu naturalnego wariancji obciążenia dynamicznego sekcji od współczynnika przyrostu obciążenia stojaków

Fig. 7. 31. Dependence of the natural logarithm of a variance of dynamic load acting on a support unit upon the coefficient of increase in load of legs

Niestety, wyniki dotychczasowych pomiarów nie upoważniają do sformułowania innych wniosków odnośnie do wpływu parametrów charakteryzujących zjawiska dynamiczne w górotworze oraz czynniki determinujące obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji na wariancję obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej, działającego od stropu.

7.3. Gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od spągu

Wyniki obliczeń gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od spągu zestawiono w tabelach 7.5 i 7.6. Tabele te zawierają również podstawowe informacje dotyczące zjawisk dynamicznych towarzyszących zarejestrowanym zmianom siły w stojakach.

Obszar oznaczoności funkcji $S_{Pf}(\omega)$ – funkcji gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej działającego na spągnice w wyrobiskach

Tabela 7.5

Zestawienie wyników obliczeń gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od spągu łupkowego

Seria pomiarowa	3/Z	17/Z	27/Z	33/Z	40/Z
Zjawisko dynamiczne	3	1	1	1	1
Energia wstrząsu [J]	—	$4{,}0\cdot10^{4}$	$2{,}0\cdot10^{4}$	$5{,}0\cdot10^{4}$	$2{,}0\cdot10^{4}$
Położenie ogn. wstrząsu	—	w	w	z	z
ω [rad·s^{-1}]	S_{Pf} [N^2·s·rad^{-1}]				
0	$1{,}325\cdot10^{-15}$	$1{,}318\cdot10^{-15}$	$2{,}605\cdot10^{-17}$	$1{,}822\cdot10^{-17}$	$7{,}888\cdot10^{-18}$
25	$3{,}347\cdot10^{12}$	$1{,}498\cdot10^{12}$	$1{,}926\cdot10^{11}$	$4{,}985\cdot10^{11}$	$1{,}626\cdot10^{10}$
49	$7{,}451\cdot10^{11}$	$1{,}206\cdot10^{12}$	$7{,}230\cdot10^{9}$	$7{,}306\cdot10^{11}$	$1{,}262\cdot10^{10}$
74		$6{,}187\cdot10^{11}$	$1{,}554\cdot10^{10}$	$1{,}265\cdot10^{11}$	$6{,}054\cdot10^{9}$
98		$7{,}198\cdot10^{10}$	$7{,}772\cdot10^{9}$	$3{,}087\cdot10^{10}$	$2{,}829\cdot10^{8}$
123					$1{,}287\cdot10^{9}$
147					$2{,}549\cdot10^{9}$
172					$3{,}203\cdot10^{8}$
Wariancja obciążenia dynamicznego sekcji [N^2]	$3{,}202\cdot10^{13}$	$2{,}635\cdot10^{13}$	$1{,}743\cdot10^{12}$	$1{,}083\cdot10^{13}$	$3{,}076\cdot10^{11}$

Legenda

Zjawisko dynamiczne:
1 — Samoistny wstrząs górotworu,
3 — Samoistny wstrząs górotworu o energii do 100 J.

Lokalizacja ogniska wstrząsu:
w — ognisko w caliźnie węglowej,
z — ognisko w zawale.

Tabela 7.6

Zestawienie wyników obliczeń gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej od spągu węglowego (in. spodku)

Seria pomiarowa	3/W	4/W	5/W	7/W
Zjawisko dynamiczne	1	3	1	1
Energia wstrząsu [J]	$2{,}0\cdot10^{4}$	—	$1{,}5\cdot10^{4}$	$5{,}0\cdot10^{2}$
Położenie ogniska wstrząsu	w	—	w	—
ω [rad·s^{-1}]	S_{Pf} [N^2·s·rad^{-1}]			
0	$1{,}308\cdot10^{-15}$	$6{,}312\cdot10^{-15}$	$1{,}308\cdot10^{-15}$	$1{,}308\cdot10^{-15}$
25	$4{,}433\cdot10^{11}$	$4{,}509\cdot10^{12}$	$7{,}093\cdot10^{12}$	$1{,}171\cdot10^{10}$
49	$5{,}165\cdot10^{11}$	$2{,}809\cdot10^{12}$	$2{,}257\cdot10^{12}$	$7{,}013\cdot10^{10}$
74	$8{,}479\cdot10^{10}$	$1{,}037\cdot10^{12}$	$3{,}788\cdot10^{9}$	$4{,}795\cdot10^{10}$
98	$1{,}099\cdot10^{11}$	$9{,}659\cdot10^{11}$	$5{,}054\cdot10^{11}$	$7{,}937\cdot10^{9}$
123	$1{,}828\cdot10^{11}$		$1{,}552\cdot10^{11}$	$6{,}683\cdot10^{9}$
147	$1{,}136\cdot10^{11}$		$1{,}627\cdot10^{10}$	$5{,}684\cdot10^{9}$
172	$7{,}282\cdot10^{10}$		$8{,}673\cdot10^{10}$	$2{,}107\cdot10^{9}$
196	$3{,}428\cdot10^{10}$			$5{,}279\cdot10^{8}$
221	$5{,}242\cdot10^{10}$			$3{,}697\cdot10^{8}$
245	$4{,}939\cdot10^{10}$			$2{,}033\cdot10^{9}$
270	$8{,}652\cdot10^{10}$			$3{,}964\cdot10^{8}$
295	$6{,}088\cdot10^{10}$			$6{,}099\cdot10^{9}$
319	$3{,}277\cdot10^{11}$			$2{,}845\cdot10^{9}$
344	$2{,}287\cdot10^{11}$			$3{,}048\cdot10^{9}$
368	$2{,}343\cdot10^{11}$			$5{,}925\cdot10^{9}$
393	$1{,}116\cdot10^{11}$			$1{,}489\cdot10^{10}$
417	$1{,}539\cdot10^{11}$			
Wariancja obciążenia dynamicznego sekcji [N^2]	$2{,}237\cdot10^{13}$	$6{,}429\cdot10^{13}$	$7{,}904\cdot10^{13}$	$1{,}471\cdot10^{12}$

Legenda

Zjawisko dynamiczne:
1 — Samoistny wstrząs górotworu,
3 — Samoistny wstrząs górotworu o energii do 100 J.

Lokalizacja ogniska wstrząsu:
w — ognisko w caliźnie węglowej.

ścianowych prowadzonych po spodku jest znacznie większy niż dla funkcji $S_{Pz}(\omega)$ gęstości widmowej mocy przebiegu obciążenia dynamicznego sekcji spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem górotworu od stropu. W przypadku widm mocy sygnału obciążenia dynamicznego, działającego na sekcję od spągu łupkowego, obszar oznaczoności funkcji $S_{Pf}(\omega)$ jest porównywalny z obszarem oznaczoności funkcji $S_{Pz}(\omega)$.

Wszystkie wykresy gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem górotworu od spągu, charakteryzuje maksimum występujące w paśmie do 70 rad·s^{-1}. Informacje dotyczące liczby lokalnych maksimów funkcji $S_{Pf}(\omega)$ zestawiono w tabeli 7.7.

Tabela 7.7

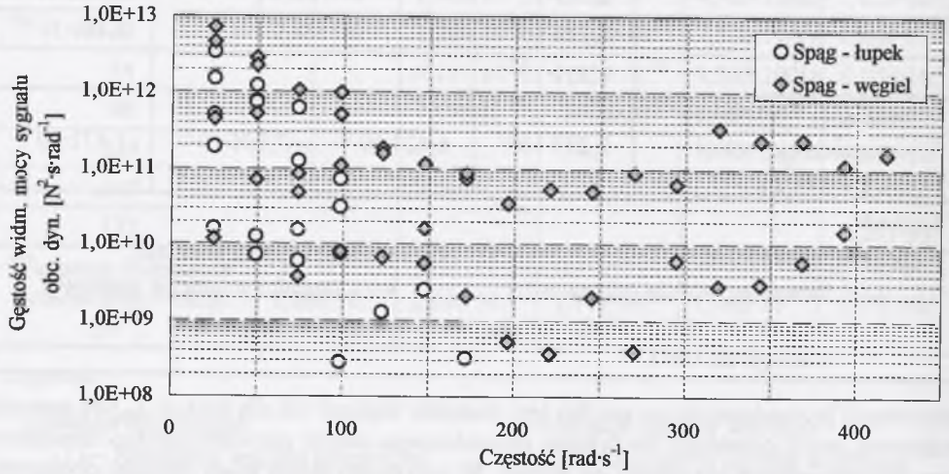
Zestawienie liczby wyznaczonych funkcji gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji według liczby lokalnych maksimów funkcji oraz zjawisk dynamicznych towarzyszących zarejestrowanym zmianom siły w stojaku

Liczba lokalnych maksimów S_{Pf}	Rodzaj zjawiska			Lokalizacja ogniska wstrząsu		
	Samoistny wstrząs górotworu	Strzelanie	Wstrząs o energii do 100 J	Zawał	Calizna węglowa	Brak danych
1	3	—	2	1	2	2
2	4	—	—	1	2	1

Na obecnym etapie badań, ze względu na małą liczbę serii pomiarowych, zarejestrowanych w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu od spągu, statystyczne opracowanie wyników obliczeń gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego dla poszczególnych częstości nie jest możliwe. Wyznaczone funkcje $S_{Pf}(\omega)$ należy więc traktować jako rezultat analizy poszczególnych serii pomiarowych. W tabelach 7.5 i 7.6 podano również wartości wariancji obciążenia dynamicznego, wyznaczone z zależności (7.7) dla rozpatrywanych przebiegów czasowych siły w stojakach przy założeniu ergodyczności procesu losowego.

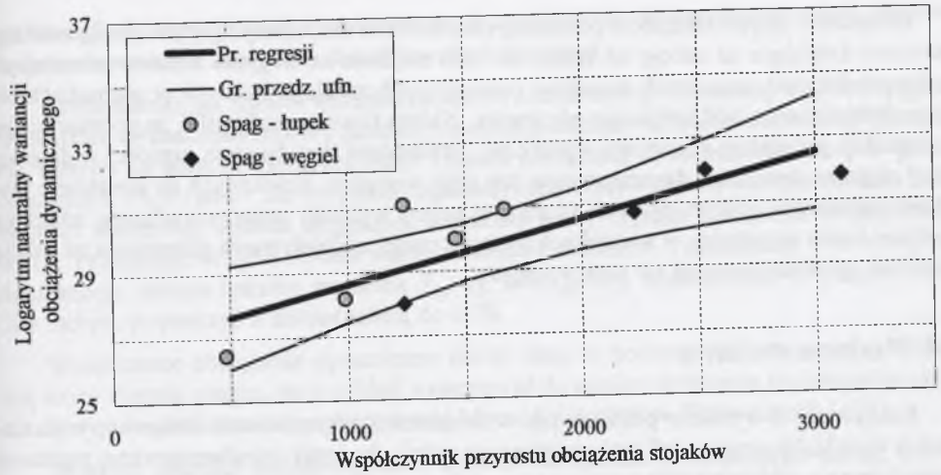
Na rys. 7.32 przedstawiono wyznaczone gęstości widmowe mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od spągu łupkowego oraz od spągu węglowego.

Zależność wariancji obciążenia dynamicznego od początkowej siły statycznej w stojakach przedstawiono na rys. 7.33.



Rys. 7.32. Wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji od spągu

Fig. 7.32. Diagram of power spectral density of dynamic load acting on a support unit from the floor



Rys. 7.33. Wpływ początkowej siły statycznej na wariancję obciążenia dynamicznego sekcji od spągu

Fig. 7.33. Effect of the initial static force on a variance of dynamic load acting on a support unit from the floor

Analizując dane zawarte w tabelach 7.5 i 7.6 oraz przedstawione na rys. 7.32 i 7.33 można jedynie stwierdzić, że dynamiczne oddziaływanie górotworu na sekcję od strony spągu węglowego skutkuje oddziaływaniem na sekcję obciążenia dynamicznego o większej gęstości widmowej mocy sygnału oraz o większej wariancji w porównaniu z analogicznymi parametrami charakteryzującymi siły oddziaływania na sekcję od strony spągu łupkowego.

Zarejestrowane przypadki obciążenia dynamicznego sekcji od spągu charakteryzuje, podobnie jak przypadki obciążenia dynamicznego od stropu (por. rys. 7.31), słaba zależność korelacyjna pomiędzy zmiennymi: $Y^* = \ln(\delta_z^2)$ a współczynnikiem przyrostu obciążenia stojaków [61]. Współczynnik korelacji pomiędzy Y^* i K_d, wyznaczony dla 9-elementowej próby wynosi 0,628, natomiast krytyczna wartość współczynnika korelacji dla 9 stopni swobody i poziomu ufności 90%, wynosi 0,582.

Zależność korelacyjna występuje również pomiędzy zmiennymi: $Y^* = \ln(\delta_z^2)$ i początkową siłą statyczną w stojakach. Współczynnik korelacji pomiędzy tymi dwiema zmiennymi losowymi wynosi 0,833. Dla 9-elementowej próby, przy poziomie ufności 90%, stwierdzono, że w populacji generalnej współczynnik korelacji pomiędzy $Y^* = \ln(\delta_z^2)$ i $F_{st,p}$ jest istotnie większy od 0,67. W przypadku rozpatrywanej zależności współczynnik determinacji wynosi 0,45.

Na rys. 7.33 zaznaczono punkty odpowiadające wyznaczonym wartościom zmiennych Y^* i $F_{st,p}$, prostą regresji określoną równaniem (7.11):

$$Y^* = 0{,}0019 \cdot F_{st,p} + 26{,}68\,; \qquad [F_{st,p}] = [\mathrm{kN}] \tag{7.11}$$

oraz granice przedziału ufności dla prostej regresji, wyznaczone na poziomie ufności 90%. Krzywoliniowa funkcja regresji otrzymana z równania (7.9) po podstawieniu zależności (7.8) przyjmuje postać (7.12):

$$\delta_z^2 = 3{,}863 \cdot 10^{11} \cdot e^{0{,}0019 \cdot F_{st,p}}\,; \qquad [\mathrm{N}^2] \quad [F_{st,p}] = [\mathrm{kN}] \tag{7.12}$$

Określenie innych związków pomiędzy parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne działające na sekcję od spągu nie było możliwe ze względu na niewystarczającą liczbę przebiegów czasowych sygnałów pomiarowych zarejestrowanych w warunkach takiego dynamicznego oddziaływania górotworu. Należy również podkreślić, że potwierdzenie w populacji generalnej słuszności wniosków i stwierdzeń dotyczących gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego, czy jego wariancji, uzyskanych na podstawie wyników pomiarów omówionych w niniejszej pracy wymaga przeprowadzenia znacznie większej liczby pomiarów w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej od strony spągu.

7.4. Podsumowanie

Korzystając z wyników pomiaru siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy, wykonanych w wyrobisku oraz modeli matematycznych sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu wyznaczono następujące parametry charakteryzujące losowe obciążenie dynamiczne sekcji:

- gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,
- wariancję obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej.

Wpływ na wartość parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu mają, między innymi, następujące wielkości, których wartość wyznaczono na podstawie pomiarów wykonanych w wyrobisku:

m_2 – masa bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu,
$\omega_{0,2}$ – druga częstość własna sekcji obudowy zmechanizowanej,
δ_2 – współczynnik tłumienia odniesiony do $\omega_{0,2}$,
δ_1 – współczynnik tłumienia odniesiony do $\omega_{0,1}$.

Przeprowadzając analizę wrażliwości modułu transmitancji widmowej modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu założono, że wartości wyżej wymienionych wielkości zmieniają się w zakresie określonym przez granice przedziału ufności wyznaczone, na poziomie ufności 90%.

Wyznaczono wartość średnią $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ modułu transmitancji widmowej modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu, wartość średnią $(\Phi_{12,j}(\omega))_{śr}$ modułu transmitancji modelu sekcji poddanej dynamicznemu o ddziaływaniu górotworu od spągu oraz granice przedziału ufności dla wyżej wymienionych wartości średnich. Stwierdzono, że zmiana wartości rozpatrywanych parametrów nieznacznie wpływa na wartość modułu transmitancji. Szerokość przedziału ufności $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$ jest mniejsza od 16,7% wartości średniej modułu transmitancji widmowej modelu sekcji. W przypadku wartości średniej modułu transmitancji widmowej modelu sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od spągu, szerokość przedziału ufności w paśmie częstości 0 ÷ 400 rad·s^{-1} jest mniejsza od 15,5% $(\Phi_{12,j}(\omega))_{śr}$. Maksymalna szerokość omawianego przedziału ufności występuje przy częstości 491 rad·s^{-1} i stanowi 24% $(\Phi_{12,j}(\omega))_{śr}$.

Zidentyfikowano parametry modeli fizycznych charakteryzujących się największą zgodnością modułu transmitancji widmowej modelu i $(\Phi_{12,j}(\omega))_{śr}$ czy też $(\Phi_{1,z}(\omega))_{śr}$. Przedstawiają je rys. 7.8 i 7.15. Modele te można wykorzystać do symulacji przebiegów czasowych wypadkowej siły w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej o założonej charakterystyce czasowej.

Stwierdzono, że zmiana wartości modułów transmitancji widmowej $\Phi_{1,z}(\omega)$ i $\Phi_{12,j}(\omega)$, w zakresie wyznaczonym przez granice przedziału ufności dla wartości średniej, nieznacznie wpływa na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji w paśmie częstości 0 ÷ 100 rad·s^{-1}. Ze wzrostem częstości rośnie wpływ zmiany wartości modułu transmitancji widmowej modelu na gęstość widmową mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji. Przyjmując w obliczeniach wartości średnie modułów transmitancji widmowej modelu sekcji, można lokalne maksima $S_{Pz}(\omega)$, lub $S_{Pf}(\omega)$, występujące w paśmie 100 ÷ 200 rad·s^{-1}, wyznaczyć z dokładnością do 15%.

Wyznaczone obciążenie dynamiczne sekcji, dane w postaci rozkładu gęstości widmowej mocy sygnału można, na przykład, zastosować do analizy wytężenia podzespołów sekcji obudowy zmechanizowanej wykonywanej Metodą Elementów Skończonych [133].

Wykresy gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, wyznaczone dla przebiegów czasowych zmian siły w stojakach zarejestrowanych w poszczególnych seriach pomiarowych, znacznie się różnią od siebie. Duża wariancja gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego jest spowodowana małą liczbą zarejestrowanych serii pomiarowych, co również uniemożliwia wyróżnienie wystarczająco licznych grup serii pomiarowych, charakteryzujących się jednorodnym dynamicznym oddziaływaniem górotworu. Zebrane dotychczas wyniki pomiarów zmian siły w stojakach, spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu, upoważniają jedynie do stwierdzenia, że maksimum gęstości widmowej mocy obciążenia zewnętrznego występuje przy częstości 24,5 rad·s^{-1} dla przypadków obciążenia dynamicznego spowodowanych zarówno strzelaniem, jak i samoistnymi zjawiskami powstałymi w górotworze. Wartości średnie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji dla poszczególnych częstości obarczone są dużym błędem.

Poszukując związków pomiędzy parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, traktowane jako zmienna losowa, a parametrami opisującymi warunki naturalne i techniczne panujące w wyrobisku, stwierdzono również, że w przypadku samoistnych wstrząsów górotworu towarzyszących obciążeniu dynamicznemu sekcji, działającemu zarówno od strony stropu, jak i od strony spągu, istnieje zależność korelacyjna pomiędzy wariancją δ_z^2 obciążenia dynamicznego sekcji a parametrami K_d lub $F_{st,p}$, charakteryzującymi przebieg czasowy wypadkowej siły w stojakach, opisana nieliniowymi funkcjami regresji (7.10) i (7.12).

Niestety, wyniki pomiarów przeprowadzonych dotychczas nie upoważniają do sformułowania innych wniosków odnośnie do wpływu czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji na wariancję obciążenia dynamicznego sekcji, czy też na gęstość widmową mocy sygnału tego obciążenia.

Stwierdzenie powyższe dotyczy szczególnie przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu. Analizując poszczególne serie pomiarowe stwierdzono jedynie, że dynamiczne oddziaływanie górotworu od strony spągu węglowego skutkuje działaniem na sekcję obciążenia dynamicznego o większej gęstości widmowej mocy sygnału oraz o większej wariancji w porównaniu z analogicznymi parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji od strony spągu łupkowego.

8. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Podstawowym źródłem informacji, wykorzystywanym do realizacji celów poznawczych i utylitarnych postawionych w niniejszej pracy, są wyniki pomiarów zmian wypadkowej siły w stojakach oraz zmian przyspieszenia stropnicy, spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu. Pomiary te wykonano w wyrobiskach ścianowych charakteryzujących się trzecim stopniem zagrożenia tąpaniami oraz, w opinii specjalistów z Zakładu Tąpań i Mechaniki Górotworu Głównego Instytutu Górnictwa, największym prawdopodobieństwem wystąpienia obciążenia dynamicznego sekcji. Badania w wyrobiskach wybranych w ten sposób przeprowadzono według metodyki przedstawionej w niniejszej pracy. Zastosowano aparaturę pomiarowo – rejestrującą opracowaną i wzorcowaną z udziałem autora niniejszej pracy. W trakcie badań dołowych potwierdzono dobre przystosowanie zarówno aparatury pomiarowo – rejestrującej, jak i metodyki badań do wykonywania długotrwałych pomiarów w trakcie eksploatacji górniczej.

W rezultacie długotrwałych pomiarów zarejestrowano 37 serii pomiarowych zawierających przebiegi czasowe wypadkowej siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy. Wieloaspektową analizę wyników tych pomiarów oraz poczynionych obserwacji przedstawiono w rozdziałach 5, 6 i 7 niniejszej pracy. W poszczególnych rozdziałach pracy przedstawiono też szczegółowe wnioski i stwierdzenia wynikające z przeprowadzonych analiz. Spośród wniosków dotyczących zastosowanej metody postępowania badawczego najistotniejsze są:

1. Przeprowadzenie pomiarów zgodnie z opracowaną metodyką umożliwiło zebranie danych niezbędnych do identyfikacji parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu od stropu bądź od spągu.
2. Analiza warunków statycznej współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem, poprzedzająca pomiary wykonywane w wyrobisku, oraz wyznaczenie siły w stojakach równoważącej statyczne obciążenie wyrobiska umożliwiły ocenę wpływu warunków statycznej współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem na parametry charakteryzujące zmiany siły w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu.
3. Przyjęta metoda postępowania badawczego umożliwiła dokonanie podziału zarejestrowanych serii pomiarowych na dwie grupy w zależności od zwrotu obciążenia dynamicznego sekcji, a następnie analizę związków pomiędzy parametrami charakteryzującymi wyróżnione dwa rodzaje obciążenia dynamicznego sekcji a czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne występujące w miejscu wykonywania pomiarów.
4. Z porównania parametrów charakteryzujących zmiany siły w stojakach spowodowane odpaleniem ładunku materiału wybuchowego z analogicznymi parametrami odnotowanymi podczas samoistnych wstrząsów górotworu wynika, że nie można zastąpić długotrwałych i uciążliwych pomiarów obciążenia sekcji spowodowanego samoistnymi zjawiskami dynamicznymi występującymi w górotworze, znacznie łatwiejszymi pomiarami obciążenia dynamicznego sekcji podczas strzelania.

Najistotniejsze wnioski dotyczące osiągniętych celów poznawczych pracy są następujące:

5. Wyróżnione dwa rodzaje obciążenia dynamicznego sekcji cechuje nie tylko inny zwrot, lecz również różne wartości parametrów charakteryzujących towarzyszące im zmiany siły w stojakach.
6. Stwierdzono istnienie bardzo silnej zależności liniowej pomiędzy wartością maksymalną siły w stojakach F_m a początkową statyczną siłą w stojakach $F_{st,p}$. Występuje ona w przypadku zmian siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego zarówno na stropnice, jak i na spągnice sekcji.
7. W większości zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej energia sprężysta przejęta przez stojaki jest ponad 30-krotnie większa od energii fali sejsmicznej działającej na sekcję. Wynika stąd, że źródłem energii działającej na sekcję nie jest sama fala sejsmiczna, lecz zmiany w stropie bezpośrednim (przemieszczenia bloków skalnych tworzących górotwór naruszony, powstanie nowych linii spękań itp.), spowodowane przejściem fali sejsmicznej przez górotwór naruszony lub wywołujące falę sejsmiczną.
8. W przypadku obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu granice przedziałów ufności, otaczających z ufnością 90% wartości średnie parametrów charakteryzujących ruch stropnicy względem spągnicy, oszacowane na podstawie przebiegu czasowego siły w stojakach, wynoszą:
   - w przypadku przemieszczenia – 0,6 ÷1,2 mm,
   - w przypadku prędkości – 14,9 ÷ 43,8 $mm \cdot s^{-1}$,
   - w przypadku przyspieszenia – 0,3 ÷ 3,7 $m \cdot s^{-2}$.

   W przypadku obciążenia dynamicznego sekcji działającego od spągu przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie, charakteryzujące ruch stropnicy względem spągnicy, mają znacznie większe wartości od podanych powyżej. Korzystając z wyników pomiarów wykonanych dotychczas można podać jedynie maksymalne wartości tych parametrów, oszacowane na podstawie pojedynczych serii pomiarowych. Wynoszą one:
   - w przypadku przemieszczenia – 4,6 mm,
   - w przypadku prędkości – 6,0 $m \cdot s^{-1}$,
   - w przypadku przyspieszenia – 101,0 $m \cdot s^{-2}$.
9. Oszacowanie energii sprężystej przejętej przez stojaki sekcji oraz analiza modeli regresyjnych sygnału przyspieszenia stropnicy umożliwiły wyznaczenie parametrów, takich jak: masa bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu, częstości własne sekcji i współczynniki tłumienia odniesione do częstości własnych – niezbędnych do identyfikacji modelu fizycznego sekcji poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. Uzyskane dotychczas wyniki pomiarów umożliwiają wyznaczenie przedziałów ufności dla wartości średnich analizowanych parametrów osobno dla każdego rodzaju obciążenia dynamicznego sekcji. Określenie wpływu innych cech charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu oraz warunki panujące w wyrobisku na wartości analizowanych parametrów nie jest obecnie możliwe.

10. W wyniku analizy wrażliwościowej modułu transmitancji widmowej modelu sekcji obudowy zmechanizowanej:
   - zidentyfikowano parametry modelu sekcji obudowy zmechanizowanej, charakteryzującego się największą zgodnością modułu transmitancji widmowej modelu z wartością średnią modułu transmitancji widmowej, wyznaczoną na podstawie pomiarów wykonanych w wyrobisku,
   - stwierdzono, że stosowanie wartości średniej modułu transmitancji widmowej modelu umożliwia wyznaczenie z dokładnością do 15% wartości lokalnych maksimów gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, występujących w paśmie $0 \div 200$ rad·s^{-1}.
11. Maksimum gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego, działającego na sekcję od stropu, występuje przy częstości 24,5 rad·s^{-1} dla obciążenia dynamicznego spowodowanego zarówno strzelaniem, jak i samoistnymi zjawiskami powstałymi w górotworze. Wartości średnie gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, wyznaczone dla poszczególnych częstości na podstawie dotychczas wykonanych pomiarów, obarczone są dużym błędem.
12. W przypadku obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu stwierdzono występowanie umiarkowanej zależności korelacyjnej pomiędzy zmiennymi $Y^* = \ln(\delta_z^2)$ a początkową siłą statyczną w stojakach F_{stp}, przy czym współczynnik determinacji, charakteryzujący tę zależność wynosi 0,45. Uzyskanie zależności o większej wartości współczynnika determinacji wymaga przeprowadzenia dalszych pomiarów.
13. Dynamiczne oddziaływanie górotworu od strony spągu węglowego skutkuje działaniem na sekcję obciążenia dynamicznego o większej gęstości widmowej mocy sygnału oraz o większej wariancji, w porównaniu z analogicznymi parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji od strony spągu łupkowego. Potwierdzenie w populacji generalnej słuszności tego wniosku wymaga przeprowadzenia dalszych badań.
14. Analizując zarejestrowane zmiany siły w stojakach oraz bibliografię dotyczącą modeli teoretycznych zjawisk dynamicznych zachodzących w górotworze określono rodzaj zjawiska dynamicznego wywołującego obciążenie dynamiczne sekcji. Większość zarejestrowanych zmian siły w stojakach spowodowały przemieszczenia skał otaczających wyrobisko, skutkujące jego zaciskaniem. Oddziaływanie silnie tłumionych drgań stropu na sekcję obudowy zmechanizowanej odnotowano jedynie w 5 seriach pomiarowych.
15. Wyniki dotychczas wykonanych pomiarów wskazują na potrzebę dalszego ich prowadzenia. Niewielka liczba zarejestrowanych serii pomiarowych uniemożliwia bowiem sformułowanie ogólnych wniosków odnośnie do związków pomiędzy parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji, czy też zmiany siły w stojaku, a czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji w wyrobisku. Stwierdzenie powyższe dotyczy szczególnie tych przypadków, kiedy dynamiczne oddziaływanie górotworu powoduje działanie obciążenia dynamicznego na spągnice sekcji obudowy zmechanizowanej.
16. Stosując test równoległości prostych regresji wykazano, że w populacji generalnej współczynnik przyrostu obciążenia – K_d – charakteryzujący zmiany siły w stojakach spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu na spągnice sekcji, jest istotnie większy od współczynnika K_d dla siły w stojakach spowodowanej obciążeniem sekcji od stropu. Z dotychczas przeprowadzonych pomiarów dołowych wynika, że maksymalna wartość współczynnika przyrostu obciążenia wynosi:

   $K_d = 1{,}80$ – dla obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu,
   $K_d = 1{,}23$ – dla obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu.

   Projektując sekcję obudowy zmechanizowanej przeznaczoną do wyrobisk zagrożonych tąpaniami należy uwzględnić maksymalne wartości współczynników przyrostu obciążenia, wynikające z wyznaczonych przedziałów ufności.
17. Analizując wpływ różnych zjawisk dynamicznych w górotworze na zmiany siły w stojakach stwierdzono, że współczynnik przyrostu obciążenia K_d, obliczony dla zmian siły w stojakach zarejestrowanych podczas obciążenia dynamicznego sekcji działającego od stropu, któremu towarzyszył samoistny wstrząs górotworu, jest istotnie większy od współczynnika przyrostu obciążenia dla przypadków obciążenia dynamicznego spowodowanego strzelaniem. Taka relacja pomiędzy współczynnikami K_d jest z punktu widzenia użytkownika sekcji obudowy zmechanizowanej korzystna, gdyż wynika z niej, że jeżeli sekcja będzie przystosowana do warunków występowania tąpań stropowych, to przeniesie ona również obciążenie dynamiczne sprowokowane przez strzelanie.
18. Wywoływanie w przestrzeniach roboczych stojaków ciśnienia odpowiadającego sile w stojakach o wartości większej od wartości siły F_o równoważącej statyczne obciążenie wyrobiska powoduje, że w przypadku dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję wartość maksymalna siły w stojakach rośnie proporcjonalnie do wartości początkowej siły statycznej, a tempo przyrostu siły w stojakach $w_{F,n}$ jest znacznie większe w porównaniu z wartościami $w_{F,n}$ charakteryzującymi zmiany siły w stojakach zarejestrowane w warunkach poprawnej współpracy obudowy zmechanizowanej z górotworem przy obciążeniach statycznych.

LITERATURA

1. Bates J. J.: An analysis of powered support behaviour. Mining Engineer. 1978 nr 203 s. 681-694.
2. Bielińska E., Figwer J.: Analiza, identyfikacja i predykcja ciągów czasowych. Skrypt Politechniki Śl. nr 1923, Gliwice 1997.
3. Biliński A.: Przejawy ciśnienia górotworu w polach eksploatacji ścianowej w pokładach węgla. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, s. Górnictwo, z. 31, Gliwice 1968.
4. Biliński A.: Metoda określenia stanu utrzymania wyrobiska w zależności od podporności obudowy ścian zawałowych. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, nr 1/74, s.1-6.
5. Biliński A.: Metoda wyznaczania zakresu prawidłowego stosowania sposobów obudowy ścian z podsadzką hydrauliczną. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, nr 1(58), s.1-6, 1983.
6. Biliński A.: Tąpania w świetle mechaniki górotworu odprężonego. Kwartalnik AGH Górnictwo, z.2, s.105-132, 1985.
7. Biliński A.: Wpływ czynników naturalnych i technicznych na stan utrzymania stropu w ścianach z podsadzką hydrauliczną. Prace Naukowe GIG, nr 778, Katowice 1993.
8. Biliński A. (i zespół): Opracowanie parametrów górniczych dla metodyki badań. Dokumentacja pracy badawczej 0200092BG. Praca niepublikowana. GIG, Katowice 1993.
9. Biliński A., Kostyk T.: Wpływ podporności obudowy na ruchy górotworu w chodnikach przyścianowych przy eksploatacji na zawał. Prace Naukowe GIG, nr 773, Katowice 1992.
10. Biliński A., Kostyk T.: Wpływ czynników naturalnych i technicznych na stan utrzymania stropu wyrobiska ścianowego. Prace Naukowe GIG, nr 779, Katowice 1993.
11. Biliński A., Kostyk T., Prusek S.: Zasady doboru obudowy zmechanizowanej do wyrobisk ścianowych. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie nr 3, 1997, s.14-23.
12. Borecki M., Chudek M., Olaszowski W., Pach A.: Kryteria i warunki współpracy obudowy z górotworem w pokładach skłonnych do tąpań. Przegląd Górniczy, nr 4, 1974, s.121-132.
13. Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: Dynamika maszyn roboczych. WNT, Warszawa 1996.
14. Budirsky S.: Dynamische Belastung der mechanisierten Ausbaus bei Gebirgsschlägen im Karbonengestein. Berg und Hüttenmähnische Monatshefte, Nr. 4, vol. 123, 1978, s.114-125.
15. Budirsky S.: Pozorovani dynamicke odolnosti mechanizovene vyztuže bez specjalni protiotřesove ochrany. Prace VVUÚ. Praca niepublikowana. Maszynopis, s.20, Biblioteka VVUÚ. Ostrava Radvanice (Rep. Czeska) 1982.
16. Budirsky St.: Interaction of powered supports and the strata in coal seams under a heavy roof. International Journal of Mining Engineering, nr 3, 1985, s.113-138.

17. Chudek M., Olaszowski W.: Modelling of the operation of dynamically loaded powered supports. Archiwum Górnictwa, t.27, z.3, s.137-152, 1982.
18. Chudek M., Zorychta A.: Obciążenia dynamiczne obudowy wyrobisk górniczych powodowanych wstrząsami masywu skalnego. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie nr 1, 1996, s. 10-13.
19. Cieślik J., Gorczyński H.: Analiza i rozkład obciążeń w głównych węzłach i zespołach sekcji obudowy ścianowej przy eksploatacji pokładów w stropie, w których zalega gruba warstwa piaskowca. Międzynarodowa konferencja naukowo techniczna „Kompleksy ścianowe do dużej koncentracji wydobycia w warunkach technicznej restrukturyzacji polskiego górnictwa". Materiały konferencyjne, CMG KOMAG, s.XX.1-6, Gliwice 1999.
20. Domagała P., Grzęda K., Stoiński K.: Modelowanie zjawisk dynamicznych w stojaku hydraulicznym zmechanizowanej obudowy ścianowej. XI Ogólnopolska konferencja „Cylinder 2001". Materiały konferencyjne – monografia pod red. A. Medera „Projektowanie, konstruowanie, badanie, wytwarzanie i eksploatacja układów hydraulicznych", CMG KOMAG 2001, s. 93-103.
21. Drzęźla B., Białek J., Jaworski A.: Analiza stref koncentracji naprężeń na wybiegu ściany N791. W: Kompleksowy projekt eksploatacji pokładów zagrożonych tąpaniami w KWK „Zabrze-Bielszowice" do 1997 r. Materiały niepublikowane, maszynopis. KWK „Zabrze-Bielszowice" 1992.
22. Dubiński J.: Sejsmologiczna charakterystyka zjawisk dynamicznych w aspekcie ich wpływu na stateczność podziemnych wyrobisk górniczych. XVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. ZN Pol. Wrocławskiej, s. Konferencje, z.33, s.39-44, Wrocław 1994.
23. Dubiński J., Wierzchowska Z.: Metody obliczeń energii wstrząsów górotworu na Górnym Śląsku. Prace GIG, Komunikat nr 591, Katowice 1973.
24. Etryk W., Barański A.: Biuletyn informacyjny nr 1 o zagrożeniu tąpaniami w polskich kopalniach węgla kamiennego w 1994 r. Państwowa Agencja Węgla Kamiennego, Katowice 1995.
25. Etryk W., Barański A.: Biuletyn informacyjny nr 3/4 o zagrożeniu tąpaniami w polskich kopalniach węgla kamiennego w latach 1996-1997. Państwowa Agencja Węgla Kamiennego, Katowice 1998.
26. Fober S.: Analiza metrologiczna systemów przekazywania informacji pomiarowych z obiektów wirujących. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1979.
27. Fober S., Markowicz J., Szweda S.: Metoda pomiarów wybranych parametrów charakteryzujących obciążenia dynamiczne obudowy zmechanizowanej występujące w warunkach eksploatacji górniczej. ZN Pol. Śląskiej, s. Górnictwo, z. 210.
28. Fober S., Markowicz J., Szweda S.: Czujnik siły przenoszonej przez podporę hydrauliczną. Zgłoszenie patentowe nr P-301738.
29. Giergel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1990.
30. Gil H.: Analityczna metoda prognozowania i zwalczania tąpań w kopalniach. Przegląd Górniczy nr 9, 1977, s. 381-386.

31. Greń J.: Statystyka matematyczna. Modele i zadania. PWN, Warszawa 1982.

32. Hagel R.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1975.

33. Hołownia J.: Tłumienie zakłóceń radioelektrycznych. WKiŁ, Warszawa 1964.

34. Horyl P., Zamarski B., Šňouparek R.: Nejzavažnejši mechanizmus vzniku dynamickeho projevu horskeho masivu a vyztuž porubu. Uhli, nr 9, 1978, s.374-377.

35. Jakubowicz A., Orłoś Z., Dyląg A.: Wytrzymałość materiałów, t. 2. WNT, Warszawa 1998.

36. Jarosz M., Poledniok J., Stoiński K., Wójcik M.: Badania zniszczeniowe cylindrów podpór hydraulicznych przeznaczonych do ścian zagrożonych tąpaniami na przykładzie KWK „Śląsk". Maszyny Górnicze, nr 4/44, 1993, s.9-15.

37. Jaszczuk M., Siwiec J.: Mikroprocesorowy układ doboru podporności wstępnej zestawów obudowy zmechanizowanej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 5-6, 1993, s. 25-28

38. Kabiesz J.: Charakterystyka skojarzonych zagrożeń górniczych w aspekcie ich oceny oraz doboru metod prewencji. Prace Naukowe GIG nr 849, Katowice 2002.

39. Klishin V.I.: Puti sozdanija sredstw zashhity mekhanizirovannykh krepej ot dinamiczeskikh nagruzok. Preprint N33 1989. Institut gornogo dela, Akademija Nauk SSSR, Novosibirsk 1989.

40. Klishin V.I.: Razrabotka sposobov i sredstw adaptacii mekhanizirowanykh krepej k dinamičeskim uslovijam nagruzhenija. Autoreferat pracy doktorskiej (habilitacyjnej). Institut Gornogo dela Sibirskogo otdelenija Rossijskoj Akademii Nauk. Novosibirsk 1998.

41. Klishin V.I.: Adaptacija mekhanizirownnykh krepej k usl'ovijam dinamiceskogo nagruzhenija. Wyd. Nauka. Novosibirsk 2002.

42. Klukan J.: Vysledky pozorovaia tlakoveho režimu v porube s vyztužom MHV 446-20/30. Spravodaj BVU v Prievidze, nr 1, 1988, s.1-6.

43. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.

44. Kłeczek Z.: Wpływ utraty stateczności wyrobiska podziemnego na znajdujące się w nim maszyny i urządzenia górnicze. W monografii pt.: Nowoczesne, niezawodne i bezpieczne systemy mechaniczne w świetle wymagań Unii Europejskiej, pod redakcją A. Medera. Szczyrk 17-19.11.2003. CMG KOMAG 2003, s. 111-121.

45. Konopko W.: Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tąpaniami. Prace Naukowe GIG nr 795, Katowice 1994.

46. Konopko W. i inni: Katalog tąpań zaistniałych w 1990 r. wraz z ich analizą. Dokumentacja pracy nr 0161016H2. GIG, Katowice 1991.

47. Konopko W. i inni: Katalog tąpań zaistniałych w 1991 r. Dokumentacja pracy nr 2502111H2. GIG, Katowice 1992.

48. Konopko W. i inni: Katalogowanie i analiza tąpań zaistniałych w 1992 r. Dokumentacja pracy nr 2061012BT. GIG, Katowice 1993.

49. Konopko W. i inni: Raport roczny (1993) o stanie zagrożeń naturalnych i technicznych w PW, ich ocena oraz kierunki ulepszania profilaktyki. GIG, Katowice 1994. Dokumentacja pracy nr 1001014 BT.

50. Konopko W., Merta G.: Metoda badań konwergencji dynamicznej wyrobisk górniczych. Monografia pt. „Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych" pod redakcją W. Konopko. GIG, Katowice 1999, s.25-57.

51. Krumnacker I., Kleefeld R.: Bemessungsgrundlagen für hydraulische Grubenstempel unter Belastung von Gebirgsschlägen. Glückauf-Forschungshefte 1985 nr 5, s. 237-244.

52. Kruszewski J., Wittbrodt E.: Drgania układów mechanicznych w ujęciu komputerowym T1. Zagadnienia liniowe. WNT, Warszawa 1992.

53. Krzyżowski A.: Profilaktyka tąpaniowa w kopalniach węgla kamiennego. Międzynarodowe sympozjum naukowo-techniczne „Tąpania 2002". Stan badań i profilaktyki, 12-15.11.2002 Ustroń, GIG, Katowice 2002, s. 193-235.

54. Litwa P., Mirek A.: Stan zagrożenia tąpaniami w górnictwie polskim w 1998 roku. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie, nr 4, 1999, s.16-24.

55. Merta G.: Parametry konwergencji dynamicznej wyrobiska korytarzowego. Monografia pt. „Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych" pod red. W. Konopko. GIG Katowice, 1999, s.59-68.

56. Mrozek B., Mrozek Z.: MATLAB 5.x SIMULNIK 2.x – poradnik użytkownika. Wyd. PLJ, Warszawa 1998.

57. Muttke G.: Parametry drgań w strefie ogniskowej indukowane eksploatacją pokładów węgla. Monografia pt. „Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych" pod red. W. Konopko. GIG, Katowice 1999, s.7-24.

58. Nahorniak E., Profaska M.: Kierunki doskonalenia identyfikacji niezawodności siłowników hydraulicznych do zmechanizowanych obudów górniczych. Ogólnopolska konferencja „Cylinder '98". Zakopane IX 1998. Maszyny Górnicze nr 76, s.104-110.

59. Olaszowski W., Kornecka A., Podgórski B., Hanaś A.: Wstępne rozpoznanie parametrów tąpań stropowych i warunków współpracy obudowy z górotworem. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 12, 1976, s.48-56.

60. Olaszowski W., Stałęga S., Wachelka L.: Analiza dynamicznego oddziaływania na obudowę drgań stropu podczas tąpań i wstrząsów. Archiwum Górnictwa, t.21, z.1, 1976, s.37-64.

61. Ostasiewicz S., Rusnak Z., Siedlecka U.: Statystyka. Elementy teorii i zadania. Wyd. Akademii Ekonomicznej im. O. Langego, Wrocław 1998.

62. Parchański J.: Pomiar siły zmiennej w czasie. ZN Pol. Śląskiej, s. Elektryka nr 89, Gliwice 1983.

63. Pawełczyk H., Gerlach Z.: Zastosowanie systemów pomiarowych dla oceny zagrożenia wstrząsami górotworu przy wybieraniu pokładu 510 w KWK „Katowice-Kleofas". Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 1997 nr 12, s.52-59.

64. Petuchov I.M.: Gornye udary na ugol'nykh shakhtakh. Izdatel'stwo Nedra. Moskwa 1972.

65. Phan Van D.: Modelování mechanizované výztuže a jeho použiti při statickém i dynamickém vypočtu. Kandidatska disertačni práce. Vysoká Škola Báňska, Fakulta Strojni, Ostrava. Praca niepublikowana. Maszynopis, biblioteka VŠB, Ostrava, 1993.

66. Praca zbiorowa pod kier. W. Konopko: Raport roczny (2002) o stanie zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. GIG Centrum Bezpieczeństwa Górniczego, Katowice 2003.

67. Praca zbiorowa pod redakcją F. Krasuckiego: Seminarium Elektryfikacji i Automatyzacji Kopalń. Kopalniana łączność teletechniczna. Skrypt Pol. Śląskiej, Zeszyt nr 7, Gliwice 1991.

68. Profaska M.: Zniszczenia elementów obudów zmechanizowanych w wyniku tąpania. Prace Naukowe GIG, seria Konferencje – „Tąpania '98", Katowice 1998, s.251-257.

69. Profaska M.: Analiza zniszczeń stojaków hydraulicznych obudów zmechanizowanych spowodowana obciążeniami dynamicznymi występującymi podczas tąpań. Międzynarodowa konferencja „Górnictwo 2000", Szczyrk 23-24 XI 1999. Stow. Wychowanków Wydz. Górnictwa i Geologii Pol. Śl., Instytut Mechanizacji Górnictwa. Materiały konferencyjne, T1 s.307-316.

70. Profaska M.: Przyczyny uszkodzeń elementów obudów zmechanizowanych zabudowanych w ścianach w których wystąpiły tąpania. Praca doktorska, maszynopis, Biblioteka Pol. Śląskiej. Gliwice 2001.

71. Romanowicz S.: Obudowy zmechanizowane sygnalizujące możliwość wystąpienia wstrząsu lub tąpnięcia. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Nowoczesne obudowy zmechanizowane do ścian o dużej koncentracji wydobycia w aspekcie warunków pracy i bezpieczeństwa". CMG KOMAG, ZG SITG, Szczyrk, maj 1995, s.XXII.1-5.

72. Romanowicz S.: Określenie korelacji pomiędzy gradientami ciśnienia w stojakach hydraulicznych obudowy zmechanizowanej a prawdopodobieństwem wystąpienia tąpnięcia. Projekt badawczy nr 9 9034 9203. Raport końcowy, materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1995.

73. Sadykov N.M.: O skorostiakh rezkikh osadok krovli i oborazovanija treshhin w massive gornykh porod. Ugol' Ukrainy, 1982 nr 2, s.17-18.

74. Shein J.: Nowa zasada oceny stateczności obudowy zmechanizowanej w warunkach dynamicznego obciążenia stropu. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczna eksploatacja obudów zmechanizowanych w warunkach technicznej restrukturyzacji górnictwa" Szczyrk 17-19. 11.1998 r. Materiały konferencyjne. CMG KOMAG 1998.

75. Sikora W., Jaszczuk M., Siwiec J.: Problematyka podporności wstępnej obudowy zmechanizowanej w aspekcie przodków o wysokiej koncentracji produkcji. Maszyny Górnicze, nr 63, 1997, s. 35-41.

76. Siwiec J.: Badania dołowe wpływu podporności wstępnej obudowy zmechanizowanej na parametry pracy kombajnu ścianowego. Praca doktorska. Biblioteka Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.

77. Stoiński K.: Metody wyznaczania obciążeń dynamicznych stojaków hydraulicznych oraz obudów ścianowych. Prace GIG, seria dodatkowa, Katowice 1985.

78. Stoiński K.: Wybrane problemy współpracy obudowy wyrobisk górniczych z górotworem w warunkach obciążeń dynamicznych – tąpań. ZN Pol. Śl., s. Górnictwo z.171 Gliwice 1988.

79. Stoiński K.: Wymagania i metodyka badania stojaków hydraulicznych pod obciążeniem udaru masy. Maszyny Górnicze nr 44, 1996, s.72-82.

80. Stoiński K.: Dobór stojaka hydraulicznego obudowy ścianowej do pracy w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. Archiwum Górnictwa, nr 3/1998, s.471-486.

81. Stoiński K.: Parametry pracy stojaków hydraulicznych obciążonych dynamicznie. W monografii: Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych, pod red. W. Konopko. GIG, Katowice 1999, s. 79-98.

82. Stoiński K.: Obudowy górnicze w warunkach zagrożenia wstrząsami górotworu. GIG, Katowice 2000.

83. Stoiński K.: Podatność zmechanizowanych obudów ścianowych – interpretacja zapisów normy PN-G-50041. Prace Naukowe GIG, seria Konferencje, nr 40. Katowice 2002, s. 61-66.

84. Szopka W.: Dane wyjściowe do projektowania obudów do pokładów tąpiących oraz analiza rozwiązań konstrukcyjnych. Informator CMG KOMAG, Maszyny Górnicze, nr 23/24, 1989, s.12-31.

85. Szuścik W.: Podział tąpań. XVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. ZN Pol. Wrocławskiej, s. Konferencje, z. 33, Wrocław 1994, s.237-246.

86. Szuścik W.: Sterowanie podpornością roboczą obudów zmechanizowanych. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Nowoczesne obudowy zmechanizowane do ścian o dużej koncentracji wydobycia w aspekcie warunków pracy i bezpieczeństwa". CMG KOMAG, ZG SITG, Szczyrk maj 1995, s. XVI.1-4.

87. Szuścik W.: Przeciwdziałanie tąpaniom występującym w wyrobiskach kopalń węgla kamiennego za pomocą obudów. XVIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. ZN Pol. Wrocławskiej, s. Konferencje, z. 36, Wrocław 1995, s.307-314.

88. Szuścik W.: Tąpania do wyrobisk ścianowych a sterowanie podpornością roboczą obudów zmechanizowanych. Materiały seminarium nt.: „Obudowy górnicze dla wyrobisk zagrożonych tąpaniami" Sekcja Tąpań Kom. Górn. PAN O.Katowice. Wisła kwiecień 1995, s.41-46.

89. Szuścik W.: Wymagana podporność obudowy zmechanizowanej w świetle obowiązujących wytycznych konstruowania, badań i przeprowadzania remontów. Konferencja „75 lat TAGOR-u". Materiały konferencyjne TFUG „TAGOR", Tarnowskie Góry 1996. s. VI.1-7.

90. Szuścik W.: Dobór obudowy zmechanizowanej do warunków zagrożenia tąpaniami. Międzynarodowe sympozjum naukowo-techniczne „Tąpania 2002". Stan badań i profilaktyki, 12-15.11.2002 Ustroń. GIG, Katowice 2002, s. 379-387.

91. Szuścik W., Bąk J., Zastawny E.: Współpraca obudowy zmechanizowanej z górotworem zagrożonym tąpaniami w ścianach prowadzonych ma zawał. Przegląd Górniczy, nr 4, 1984, s.99-102.

92. Szuścik W., Bąk J., Zastawny E.: Praca obudowy zmechanizowanej dostosowanej do warunków występowania tąpań w przodkach ścianowych o zmiennej wielkości obciążenia dynamicznego. ZN Pol. Śląskiej, s. Górnictwo, z.145, Gliwice 1987, s.345-356.

93. Szuścik W., Fober S., Markowicz J., Szweda S.: Badania parametrów ruchowych charakteryzujących obciążenie statyczne i dynamiczne obudów zmechanizowanych wywołane wstrząsami i tąpaniami. Etap I – Opracowanie koncepcji rozeznawczych badań dołowych. Sprawozdanie z pracy NB-119/RG-4/EG-2/86. Praca niepublikowana, maszynopis; Biblioteka IMG Pol. Śląskiej, Gliwice 1986.

94. Szuścik W., Szweda S., Fober S., Markowicz J.: Badania parametrów ruchowych charakteryzujących obciążenia statyczne i dynamiczne obudów zmechanizowanych wywołane wstrząsami i tąpaniami – Etap IV. Praca niepublikowana, maszynopis. Biblioteka IMG Pol. Śląskiej, Gliwice 1989.

95. Szuścik W., Szweda S., Fober S., Markowicz J.: Badania parametrów ruchowych charakteryzujących obciążenia statyczne i dynamiczne obudów zmechanizowanych wywołane wstrząsami i tąpaniami – Etap V. Praca niepublikowana, maszynopis. Biblioteka IMG Pol. Śląskiej, Gliwice 1990.

96. Szweda S.: Badania obciążeń dynamicznych obudów zmechanizowanych wywołanych słabymi wstrząsami górotworu. XIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. ZN Pol. Wrocławskiej, s. Konferencje, z. 41, Wrocław 1991, s.237-240.

97. Szweda S.: Wyznaczanie obciążeń dynamicznych ścianowych obudów zmechanizowanych wywołanych wstrząsami i tąpaniami. ZN Pol. Śląskiej, s. Górnictwo, z. 205, Gliwice 1992, s.297-303.

98. Szweda S.: Badania nad konstrukcją i dynamiką obciążeń obudów zmechanizowanych. Sprawozdanie z pracy BK-538/RG-2/92. Praca niepublikowana, maszynopis. Biblioteka IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.

99. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 15/31-Oz w ścianie N791 KWK „Zabrze-Bielszowice". Etap 1 – wrzesień 1992. Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1992.

100. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 15/31-Oz w ścianie N791 KWK „Zabrze-Bielszowice". Etap 2 – listopad 1992, Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1992.

101. Szweda S.: Zastosowanie modeli regresyjnych sygnału przyspieszenia stropnicy do wyznaczania częstości własnych wolnostojącej sekcji obudowy zmechanizowanej. IV Międzynarodowa Konferencja „Zastosowania Mechaniki w Górnictwie" Dzierżno, 27-28.03.2003 r. Instytut Mechanizacji Górnictwa Pol. Śląskiej, Materiały konferencyjne, s. 189-194.

102. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 15/31-Oz w ścianie N791 KWK „Zabrze-Bielszowice". Etap 3 – styczeń 1993. Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1993.

103. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 12/28-Oz w ścianie IV KWK „Wujek". Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1993.

104. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 15/31-Oz w ścianie 8 KWK „Śląsk". Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1994.

105. Szweda S.: Sprawozdanie z badań dołowych obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej FAZOS 12/28-Oz w ścianie 758 KWK „Porąbka-Klimontów". Materiały niepublikowane. CMG KOMAG, Gliwice 1994.

106. Szweda S.: Wpływ warunków statycznej pracy obudowy zmechanizowanej na wielkość obciążeń dynamicznych wywołanych nieeksplozyjnymi tąpaniami stropowymi. Przegląd Górniczy nr 11, 1995 s. 8-11.

107. Szweda S.: Obciążenia dynamiczne obudów zmechanizowanych w ścianach zagrożonych eksplozyjnymi tąpaniami spodkowymi. Przegląd Górniczy nr 11, 1996, s.22-26.

108. Szweda S.: Dynamic loads acting onto shield support from floor side. Proc. of International Conference „Geomechanics '96". Rožnov p. R. (Republika Czeska) wrzesień 1996. A.A.Balkema 1997, s.105-109.

109. Szweda S.: Energia przejmowana przez stojaki podczas obciążeń dynamicznych obudowy zmechanizowanej. XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu – Katedra Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH. Materiały konferencyjne, Kraków 1998, s. 435-442.

110. Szweda S.: Zastosowanie analizy modalnej do identyfikacji parametrów modelu funkcjonalnego układu górotwór – obudowa zmechanizowana. Sprawozdanie z pracy BW-514/RG-0/98. Praca niepublikowana. Biblioteka IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

111. Szweda S.: Modelowanie obciążeń niszczących obudowę zmechanizowaną. Sprawozdanie z pracy BW-561/R-0/99. Praca niepublikowana, maszynopis, Biblioteka IMG Pol. Śląskiej, Gliwice 1999.

112. Szweda S.: Einfluss der Setzlast auf die dynamischen Belastungen von Schreitausbau. Glückauf Forschungshefte nr 4 (2000) s. 128-131.

113. Szweda S.: Wpływ strzelań torpedujących w ścianach na obudowę zmechanizowaną. Przegląd Górniczy nr 1, 2000, s.15-19.

114. Szweda S.: Loadings of legs in sections of mechanised supports by dynamic movements of roof and floor. Archives of Mining Sciences Vol. 46 nr 3 (2001) s. 237-266.

115. Szweda S.: Wpływ podporności wstępnej sekcji na obciążenia obudowy zmechanizowanej spowodowane dynamicznym oddziaływaniem stropu. Maszyny Górnicze nr 1/85, 2001 r. s. 44-49.

116. Szweda S.: Loads on legs in powered roof support units caused by dynamic action of rock mass. Sbornik vedeckych prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava Řada strojní 1 (2001) část 2 s. 119-133.

117. Szweda S.: Maximal loads acting on legs of powered roof support unit in longwalls with bumping hazard. Journal of Coal Science & Engineering (China) Vol. 7 nr 2 (2001) s. 1-15.

118. Szweda S.: Wyznaczanie częstości drgań własnych sekcji obudowy zmechanizowanej. Maszyny Górnicze nr 91, 2002, s. 15-22.

119. Szweda, S.: Dinamicheskoe vozdiejstvie gornogo massiva na stojki mekhanizirovannykh krepi. Fiziko-tekhnichesie problemy poleznykh iskopaemykh.Izdatel'stvo Sibirskogo Otdelenija RAN Novosibirsk nr 2 (2003) s. 55-62.

120. Tomski L.: Dynamika stojaków hydraulicznych obudów górniczych. ZN Pol. Częstochowskiej, nr 17, Częstochowa 1979.

121. Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa 1997.

122. Uhl T., Lisowski W.: Praktyczne problemy analizy modalnej konstrukcji. Cracow Centre for Advanced Training in Information Engineering. Wyd. AGO, Kraków 1996.

123. Węgrzyn S.: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1980.

124. Zacharski M. (kier.): Wpływ cech konstrukcyjnych obudowy i organów urabiających na energochłonność urabiania. Etap II. Symulacja zachowania się obudowy zmechanizowanej pod działaniem obciążenia dynamicznego – porównanie z badaniami stanowiskowymi. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 9.SG0108106. Praca niepublikowana. CMG KOMAG, Gliwice 1994.

125. Zacharski M. (kier.): Wpływ cech konstrukcyjnych obudowy i organów urabiających na energochłonność urabiania. Etap III. Stateczność systemu obudowy w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 9.SG0108106. Praca niepublikowana. CMG KOMAG, Gliwice 1996.

126. Zastawny E.: Wyznaczenie obszaru występowania tąpań w przestrzeni naprężeń w oparciu o badania laboratoryjne na próbkach węgla. Praca doktorska. Maszynopis, Biblioteka Pol. Śląskiej, Gliwice 1979.

127. Zastawny E.: Hipoteza obszaru występowania zjawiska tąpania. Prace naukowe Inst. Geotechniki Pol. Wrocławskiej, nr 31, Wrocław 1980.

128. Zastawny E.: Przyczynek do badań nad wpływem podporności obudowy hydraulicznej na występowanie tąpań pokładowych w kopalniach węgla kamiennego. XIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Materiały konferencyjne. Szklarska Poręba 1991.

129. Zastawny E.: Tąpania eksplozyjne do przodka ścianowego w modelach pokładu węgla w świetle badań laboratoryjnych. ZN Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 217, Gliwice 1993

130. Zorychta A.: Wpływ warunków naturalnych i technologicznych na zagrożenie tąpaniami. Kwartalnik AGH Górnictwo z. 2, 1988, s.69-99.

131. Zorychta A.: Geomechaniczne przesłanki doboru metod minimalizacji zagrożenia wstrząsowego. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie nr 7, 1997, s. 7-11.

132. Instrukcja stosowania sejsmologii górniczej do oceny stanu zagrożenia tąpaniami. Katowice 1988.

133. MSC/NASTRAN Version 70.5 Quick Reference Guide. The MacNeal-Schwendler Corporation, 1998.

134. Norma Polska PN-88/M-42 000. Automatyka i pomiary przemysłowe. Terminologia.

135. Polska Norma PN-EN 1804-1: 2004. Maszyny dla górnictwa podziemnego – Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej – Część 1: Sekcje obudowy i wymagania ogólne.

136. Protokół z posiedzenia Komisji ds. Tąpań w KWK „Zabrze-Bielszowice" dnia 17.10.1992 r. Materiały niepublikowane Komisji ds. Tąpań. GIG, Katowice.

137. Protokół nr 64/93 z posiedzenia Zespołów ds. Tąpań, Obudowy i Kierowania Stropem w KWK „Śląsk" z dnia 25.08.1993 r. Materiały niepublikowane

138. Protokół nr 8/93 z posiedzenia Komisji ds. Tąpań w Kopalniach Węgla Kamiennego z dnia 31.08.1993. KWK „Śląsk". Materiały niepublikowane.

139. Protokół nr 9/94 z posiedzenia Kopalnianego Zespołu ds. Tąpań odbytego w dniu 08.12.1994. KWK „Porąbka-Klimontów". Materiały niepublikowane.

140. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 14.06.2002 w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. DzU z dnia 1.07.2002.

141. Tąpania – Regulacje prawne – Zarządzenie Prezesa WUG z dnia 3.08.1994 w sprawie określenia kryteriów oceny zagrożeń naturalnych oraz trybu zaliczania złóż kopalin, ich części lub wyrobisk górniczych do poszczególnych stopni zagrożeń. Monitor Polski nr 45, poz. 368 z 19.08.1994.7

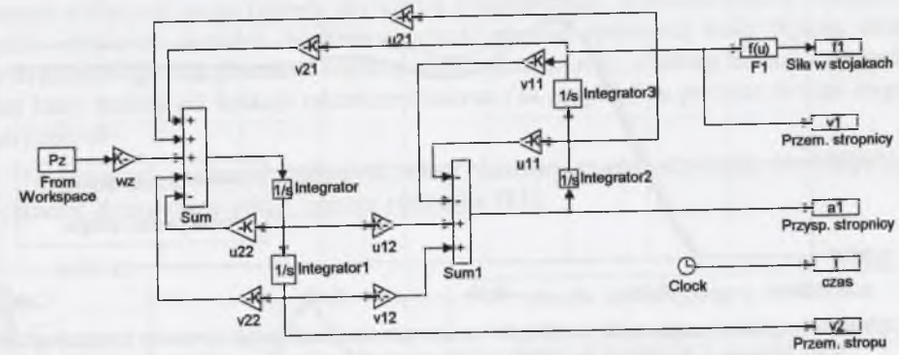
ZAŁĄCZNIK

WYBRANE PRZYKŁADY SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ODDZIAŁYWANIA OBCIĄŻENIA DYNAMICZNEGO NA SEKCJĘ OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ

Modele sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu, rozpatrywane w rozdziałach 4.2 i 4.3 niniejszej pracy, można wykorzystać do analizy oddziaływania na sekcję obciążenia dynamicznego o zadanym przebiegu czasowym. Parametry tych modeli, zidentyfikowane z wykorzystaniem wyników pomiarów wykonywanych w wyrobisku, przedstawiono na rysunkach 7.8 i 7.15. Wybrane przykłady symulacji komputerowej siły w stojakach oraz przemieszczeń mas m_1 i m_2 modelu przedstawione poniżej zaprezentowano celem zilustrowania możliwości zastosowania modeli do analizy oddziaływania obciążenia dynamicznego o założonym przebiegu czasowym na sekcję obudowy zmechanizowanej.

Z.1. Symulacja dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję od stropu

Układ równań różniczkowych (4.20) modelu matematycznego sekcji rozwiązano stosując nakładkę SIMULINK programu MATLAB v. 5.0. Model matematyczny sekcji, zapisano w programie SIMULINK w postaci schematu blokowego przedstawionego na rysunku Z.1.

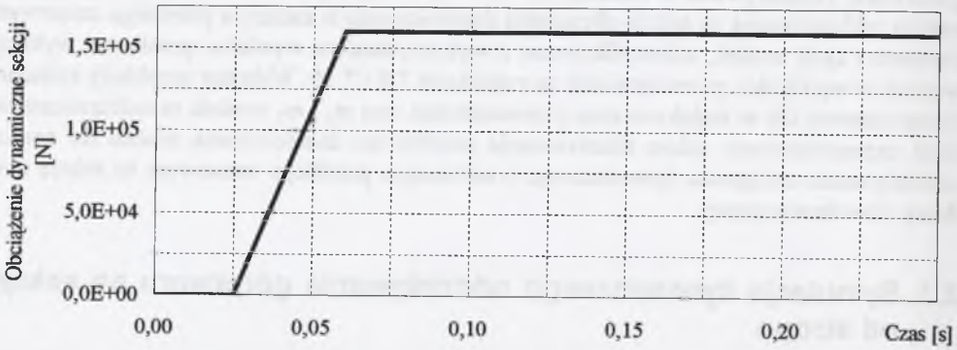


Rys. Z.1. Schemat blokowy modelu matematycznego sekcji poddanej obciążeniu dynamicznemu od stropu, zapisany w programie SIMULINK

Fig. Z.1. Block diagram of a mathematical model of a support unit subjected to dynamic load acting on the support unit from the roof, formulated in the SIMULINK program

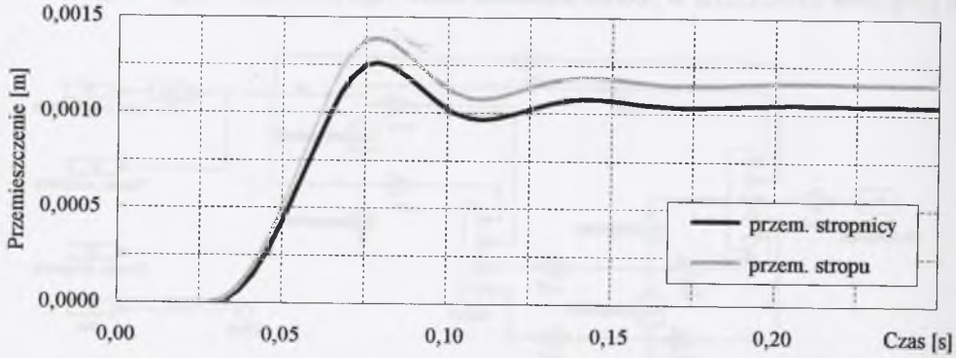
Wartości współczynników – w_z, $v_{i,j}$, $u_{i,j}$ (dla $i, j = 1, 2$) wyznaczono przyjmując wartości parametrów modelu przedstawionego na rysunku 7.8. Wielkości charakteryzujące przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji zapisuje się w przestrzeni roboczej programu MATLAB w postaci dwukolumnowej macierzy **Pz** (rys. Z.1). Wyrazy pierwszej kolumny określają czas symulacji, a wyrazy drugiej kolumny wartości obciążenia dynamicznego sekcji w odpowiedniej chwili czasowej. Wyniki obliczeń zapisywane są w postaci jednokolumnowych macierzy **f1**, **y1**, **y2**, **a1**, **a2** oraz **t**. Wartość siły w stojakach wyznaczana jest w bloku funkcyjnym F1 za pomocą zależności (4.15).

Realizacja symulacji komputerowej przebiegów czasowych siły w stojakach wymaga znajomości przebiegu czasowego obciążenia dynamicznego sekcji. W przykładzie przedstawionym poniżej przyjęto, że pękanie warstw górotworu naruszonego (w wyniku pojawiania się nowych szczelin) skutkuje działaniem na sekcję obudowy zmechanizowanej obciążenia dynamicznego, którego przebieg czasowy, przedstawiony na rysunku Z.2, aproksymowano funkcją odcinkami liniową.



Rys. Z.2. Przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji od stropu, przyjęty do obliczeń

Fig. Z.2. Time related course of dynamic load acting on a support unit from the roof, assumed for calculations

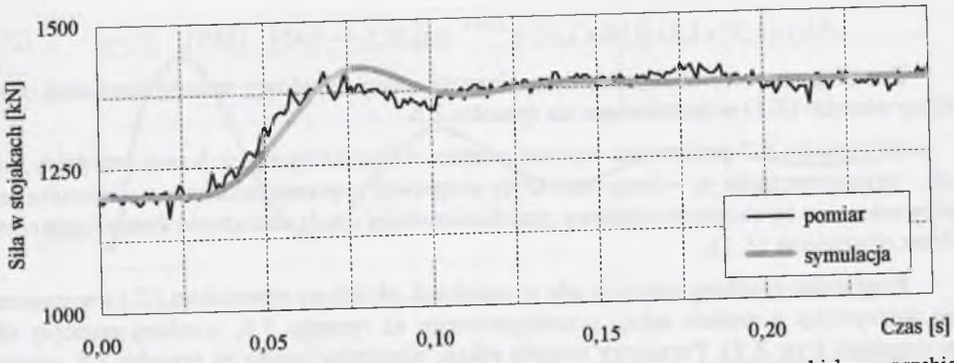


Rys. Z.3. Porównanie wyznaczonych przebiegów czasowych przemieszczenia stropnicy i przemieszczenia bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu od stropu

Fig. Z.3. Comparison of the determined time related courses of displacement of a canopy and of displacement of the roof rock block acting on a support unit under conditions of dynamic action of the rock body exerted from the roof

Wyniki obliczeń zilustrowano wykresami przedstawionymi na rysunkach Z.3 i Z.4.

Na rysunku Z.4 porównano przebieg czasowy siły w stojakach, zarejestrowany w ścianie N791 w pokładzie 502 w KWK „Zabrze-Bielszowice" podczas serii pomiarowej 14/Z, z wynikiem symulacji komputerowej przebiegu czasowego tej siły. Zmiana wartości obciążenia statycznego sekcji, równa przyrostowi obciążenia dynamicznego, przyjętego w obliczeniach (rys. Z.2) powoduje zmianę wartości statycznej siły w stojakach, równą różnicy wartości sił F_{stk} i F_{stp} zarejestrowanych podczas serii pomiarowej 14/Z.



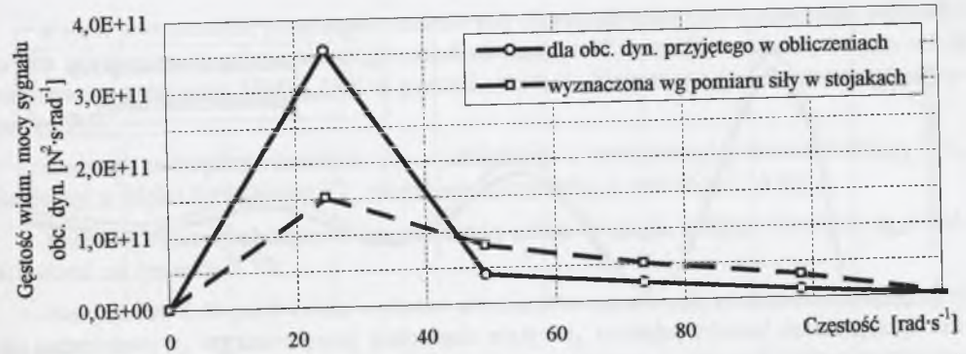
Rys. Z.4. Porównanie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w wyrobisku, z przebiegiem czasowym siły w stojakach wyznaczonym z obliczeń

Fig. Z.4. Comparison of the time related course of force in legs, as recorded in underground working, with the time related course of force in legs determined by means of calculations

Na rysunku Z.5 porównano wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, przedstawionego na rysunku Z.2, z wykresem gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, wyznaczonej z zależności (4.36) na podstawie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego podczas serii pomiarowej 14/Z.

Jakkolwiek wyniki symulacji przebiegu czasowego siły w stojakach charakteryzuje duża zgodność z wynikami pomiaru siły w stojakach, wykonanymi w wyrobisku, to wykresy gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego, przedstawione na rysunku Z.5, istotnie różnią się od siebie. Większą zgodność gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji można uzyskać aproksymując jego przebieg czasowy za pomocą innej klasy funkcji niż funkcje odcinkami liniowe (na przykład za pomocą funkcji trygonometrycznych).

Na przykład, analizując podatność sekcji obudowy zmechanizowanej przyjmuje się, że obciążenie dynamiczne sekcji opisuje równanie [83]:



Rys. Z.5. Porównanie wykresów gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji przyjętego do obliczeń i wyznaczonego na podstawie wyników pomiarów w wyrobisku

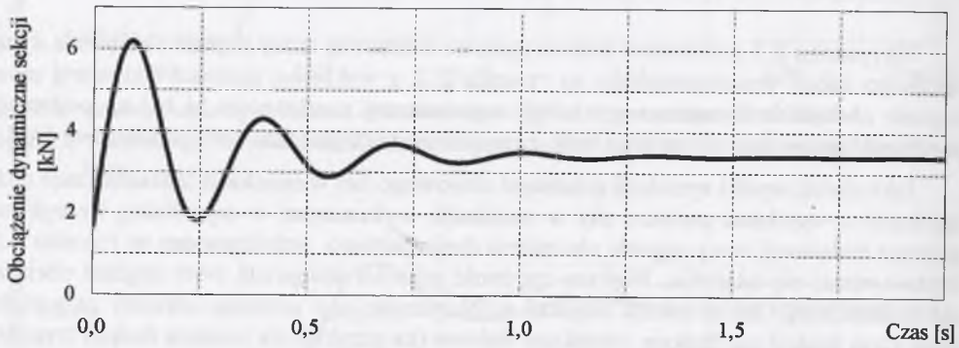
Fig. Z.5. Comparison of diagrams of the spectral density of power of dynamic load acting on a support unit, as assumed for calculations, with that determined on the basis of results of measurements carried out in underground working

$$P_z(t) = 1{,}50 + 1{,}90 \cdot \left[1{,}90 + 2{,}07 \cdot e^{-3{,}691 \cdot t} \cdot \sin(20{,}5 \cdot t - 0{,}45\right]; \quad [\mathrm{MN}], \quad [t] = \mathrm{s} \qquad (Z.1)$$

Przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej określony wzorem (Z.1) przedstawiono na rysunku Z.6.

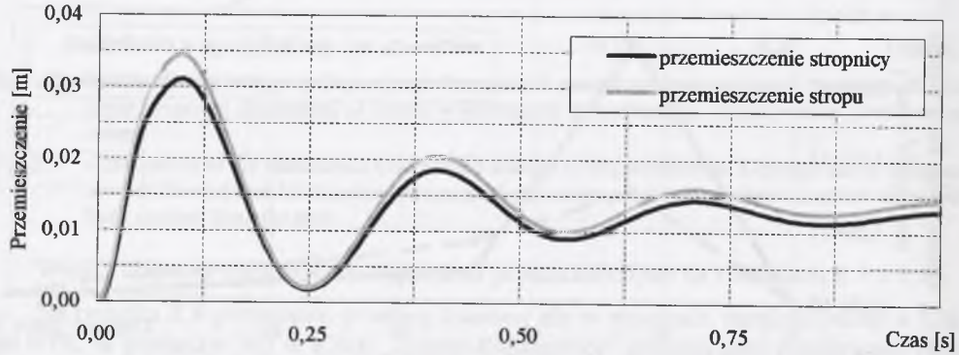
Na rysunku Z.7 porównano wykresy wielkości charakteryzujących ruch stropnicy sekcji – przemieszczenie y_1 – oraz ruch bryły stropowej – przemieszczenie y_2, wyznaczone, przy założeniu że na sekcję obudowy zmechanizowanej działa obciążenie dynamiczne określone równaniem (Z.1).

Przyjmując przebieg czasowy siły w stojakach określony równaniem (Z.1) wyznaczono, korzystając z modelu sekcji przedstawionego na rysunku 7.8, przebieg czasowy siły w stojakach (rys. Z.8). Parametry modelu sekcji, przedstawionego na rysunku 7.8, wyznaczono przyjmując dane dotyczące sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS 15/31-Oz. Symulację komputerową przebiegu czasowego siły w stojakach wykonano pomijając wpływ



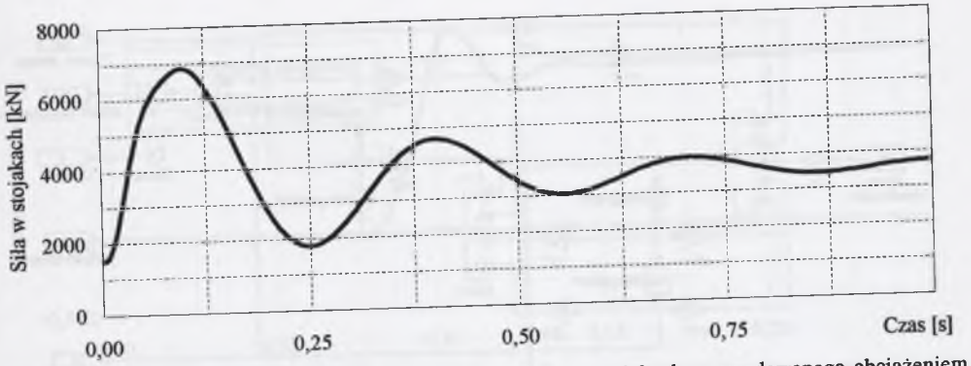
Rys. Z.6. Przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji przyjmowany w obliczeniach podatności sekcji [83]

Fig. Z.6. Time related course of dynamic load acting on a support unit assumed for calculations of yield of the support unit [83]



Rys. Z.7. Symulacja komputerowa przebiegu czasowego przemieszczenia stropnicy oraz przemieszczenia bryły stropowej, spowodowanego obciążeniem dynamicznym sekcji określonym równaniem (Z.1)

Fig. Z.7. Computer simulation of the time related course of displacement of a canopy and of displacement of the roof rock block caused by dynamic load acting on a support unit expressed by the equation (Z.1)



Rys. Z.8. Symulacja komputerowa przebiegu czasowego siły w stojakach, spowodowanego obciążeniem dynamicznym sekcji określonym równaniem (Z.1)

Fig. Z.8. Computer simulation of the time related course of force in legs caused by dynamic load acting on a support unit expressed by the equation (Z.1)

działania zaworu roboczego na przebieg ciśnienia w stojakach oraz zakładając, że stojaki hydrauliczne sekcji nie są wyposażone w zawory upustowe.

Nominalna wartość siły w stojakach sekcji obudowy zmechanizowanej typu FAZOS 15/31-Oz wynosi 3000 kN. Z przebiegu czasowego przedstawionego na rysunku Z.8 wynika, że oddziaływanie na sekcję obciążenia dynamicznego określonego równaniem (Z.1) wywołuje w stojakach siłę o wartości maksymalnej wynoszącej 6800 kN. W rozpatrywanym przypadku współczynnik przyrostu obciążenia wynosi więc 2,52. Zmiana siły w stojakach, charakteryzująca się współczynnikiem przyrostu obciążenia o wartości większej od 2,2, może spowodować utratę szczelności i funkcjonalności stojaka wskutek trwałego odkształcenia cylindra.

Z.2. Symulacja dynamicznego oddziaływania górotworu na sekcję od spągu

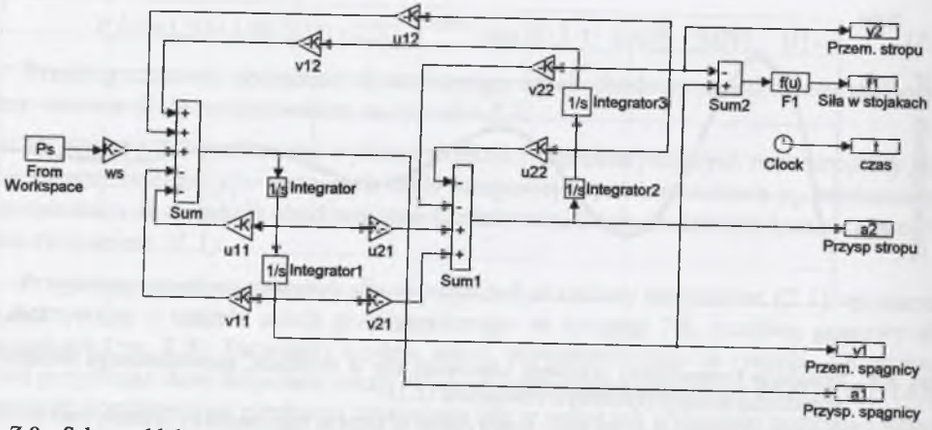
Celem wyznaczenia przebiegów czasowych charakteryzujących dynamiczne oddziaływania górotworu na sekcję od spągu układ równań (4.37) modelu matematycznego sekcji zapisano w programie SIMULINK w postaci schematu blokowego przedstawionego na rysunku Z.9.

Związek pomiędzy wartością siły w stojakach a wartościami przemieszczeń y_1 i y_2, zapisany w bloku funkcyjnym F1, określono korzystając z zależności (4.46).

Przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji od spągu, przyjęty do obliczeń, przedstawiono na rysunku Z.10.

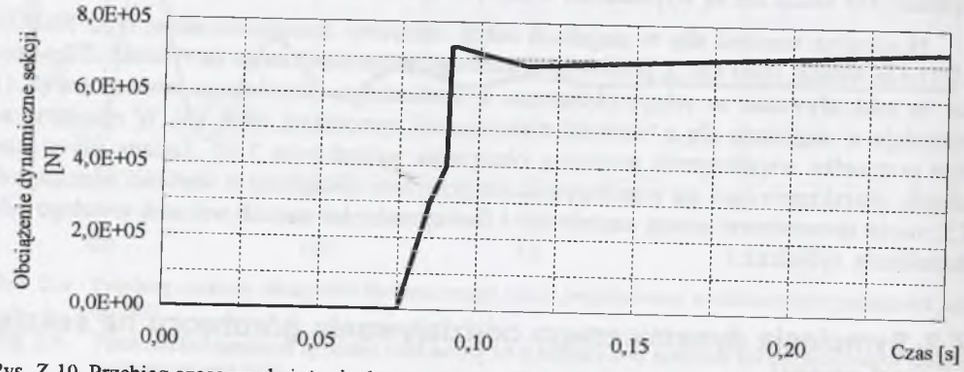
Na rysunku Z.11 porównano wykresy przebiegów czasowych: przemieszczenia spągnicy – zmiennej y_1 wyznaczającej położenie masy m_1 modelu, równej masie sekcji zredukowanej do środka masy spągnicy – oraz przemieszczenia stropowej bryły górotworu – zmiennej y_2. Wykres przemieszczenia stropowej bryły górotworu przedstawiono na rysunku Z.12.

Zgodnie z układem współrzędnych, przyjętym na rysunku 7.15, dodatnia wartość przemieszczenia y_2 jest równoznaczna ze zwrotem wektora przemieszczenia bryły stropowej



Rys. Z.9. Schemat blokowy modelu matematycznego sekcji poddanej obciążeniu dynamicznemu od spągu, zapisany w programie SIMULINK

Fig. Z.9. Block diagram of a mathematical model of a support unit subjected to dynamic load acting on the support unit from the floor, formulated in the SIMULINK program



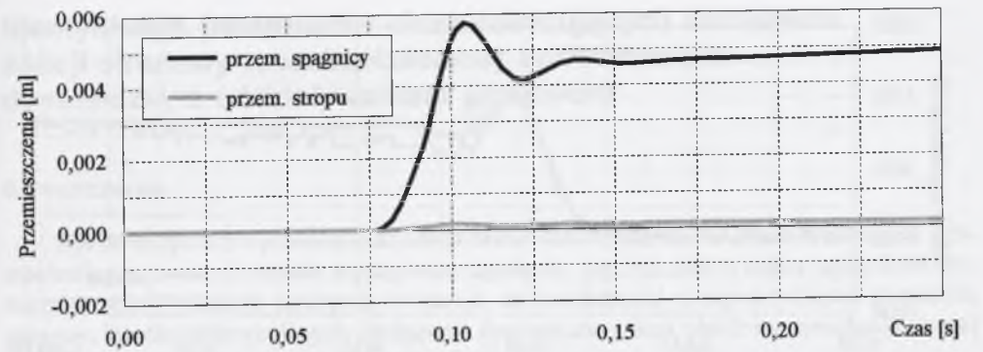
Rys. Z.10. Przebieg czasowy obciążenia dynamicznego sekcji od spągu, przyjęty do obliczeń

Fig. Z.10. Time related course of dynamic load acting on a support unit from the floor, assumed for calculations

w górę, w stronę górotworu nienaruszonego. Maksymalna wartość przemieszczenia y_2, bryły stropowej, względem górotworu nienaruszonego, wyznaczona za pomocą symulacji komputerowej, jest mniejsza od 0,16 mm. Przemieszczenie bryły stropowej o 0,16 mm względem warstwy górotworu nienaruszonego można uznać za fizycznie możliwe.

Na rysunku Z.13 przedstawiono porównanie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w ścianie IV pokładu 501 w KWK „Wujek" (seria pomiarowa 5/W) z wynikiem symulacji komputerowej siły w stojakach spowodowanej obciążeniem dynamicznym sekcji pokazanym na rysunku Z.10.

W fazie narastania siły w stojakach od wartości początkowej siły statycznej do wartości maksymalnej przebieg czasowy, uzyskany w wyniku symulacji komputerowej, charakteryzuje dobra zgodność z przebiegiem czasowym siły w stojakach zarejestrowanym w wyrobisku. Błąd zgodności symulacji komputerowej przebiegu czasowego siły w stojakach, z przebiegiem czasowym tej siły, zarejestrowanym w wyrobisku, jest mniejszy od 5,4%.



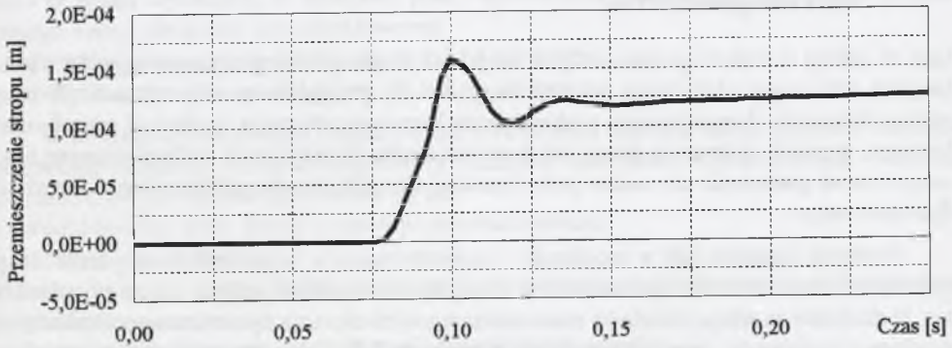
Rys. Z.11. Porównanie wyznaczonych przebiegów czasowych przemieszczenia spągnicy i przemieszczenia bryły w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu od spągu

Fig. Z.11. Comparison of the determined time related courses of displacement of a base and of displacement of the rock block under conditions of dynamic action of the rock body exerted from the floor

W fazie obniżania wartości siły w stojakach zgodność przebiegów czasowych przedstawionych na rysunku Z.13 jest nieco gorsza, gdyż maksymalna wartość błędu zgodności wynosi wtedy 8,4%.

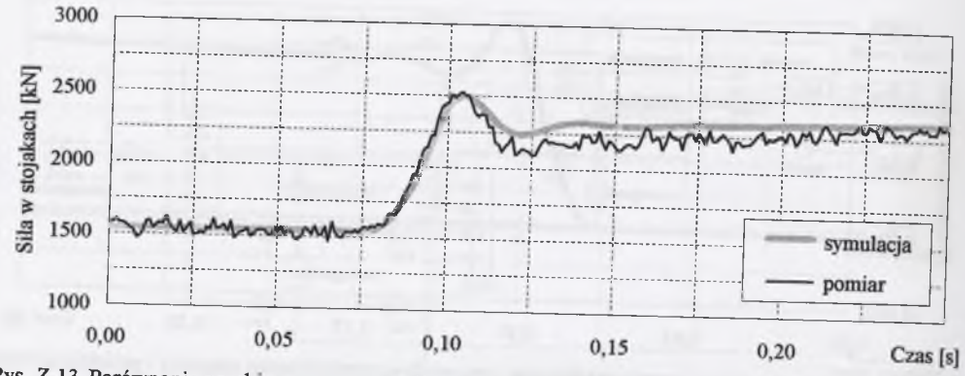
Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wariancja obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej o przebiegu czasowym przedstawionym na rysunku Z.10 jest o 22,5% większa od wariancji obciążenia dynamicznego sekcji, wyznaczonego na podstawie pomiarów siły w stojakach. Na rysunku Z.14 porównano wykres gęstości widmowej mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji, o przebiegu czasowym przedstawionym na rysunku Z.10, z wykresem gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji wyznaczonej z zależności (4.49) na podstawie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w wyrobisku.

Należy zaznaczyć, że nawet uzyskanie dużej zgodności, zarówno przebiegów czasowych siły w stojakach – zarejestrowanego w wyrobisku i wyznaczonego z obliczeń, jak i wariancji obciążenia dynamicznego sekcji – przyjętego w obliczeniach i wyznaczonego na podstawie pomiarów, nie upoważnia do stwierdzenia, iż obciążenie dynamiczne działa-



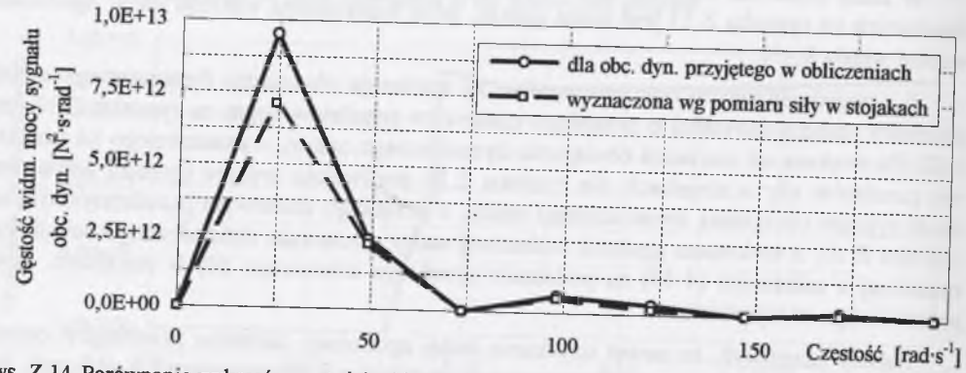
Rys. Z.12. Przemieszczenie bryły stropowej w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu od spągu

Fig. Z.12. Displacement of the roof rock block under conditions of dynamic action of the rock body exerted from the floor



Rys. Z.13. Porównanie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w wyrobisku (seria pomiarowa 5/W), z przebiegiem czasowym siły w stojakach wyznaczonym z obliczeń

Fig. Z.13. Comparison of the time related course of force in legs, as recorded in underground working (measuring series 5/W), with the time related course of force in legs determined by means of calculations



Rys. Z.14. Porównanie wykresów gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji, przyjętego do obliczeń i wyznaczonego na podstawie wyników pomiarów w wyrobisku

Fig. Z.14. Comparison of diagrams of the spectral density of power of dynamic load acting on a support unit, as assumed for calculations, with that determined on the basis of results of measurements carried out in underground working

jące na sekcję w trakcie pomiaru siły w stojakach miało przebieg czasowy zgodny z przebiegiem czasowym obciążenia dynamicznego sekcji, przyjętym w obliczeniach. W przypadku obciążenia dynamicznego o charakterze losowym odwrotna dyskretna transformata Fouriera gęstości widmowej mocy jest bowiem równa funkcji autokorelacji procesu losowego i na tej podstawie nie można jednoznacznie określić przebiegu czasowego obciążenia dynamicznego.

Przebiegi czasowe siły w stojakach – zarejestrowane w wyrobisku i otrzymane drogą symulacji komputerowej – porównano w niniejszym załączniku jedynie celem potwierdzenia, iż działanie na sekcję obudowy zmechanizowanej obciążenia dynamicznego o założonym przebiegu czasowym, przedstawionym na rysunkach 7.2 i 7.10, wywołuje siłę w stojakach o przebiegu czasowym nie różniącym się jakościowo od przebiegów czasowych zarejestrowanych w wyrobisku.

Identyfikacja parametrów charakteryzujących obciążenie sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu

Streszczenie

Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań dołowych, analiza teorii opisujących geomechaniczne uwarunkowania wystąpienia tąpnięcia, czy też interpretacja uszkodzeń elementów sekcji wskutek tąpnięcia, wskazują na konieczność przeprowadzania pomiarów parametrów charakteryzujących obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku zagrożonym tąpaniami.

W niniejszej pracy pojęcie – obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej – zdefiniowano jako siłę, zmienną w czasie, działającą od strony górotworu na sekcję ścianowej obudowy zmechanizowanej w następstwie dynamicznego oddziaływania górotworu. Przedmiotem pracy jest identyfikacja parametrów charakteryzujących dynamiczne oddziaływanie górotworu na stropnicę lub spągnice sekcji obudowy zmechanizowanej, powodujące zmiany siły w stojakach o czasie narastania dłuższym niż 0,01 s oraz o średnim tempie jej przyrostu przynajmniej o 25% większym od maksymalnej wartości średniego tempa przyrostu siły w stojakach, spowodowanego rozpieraniem sekcji. Identyfikowanymi parametrami, charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, traktowane jako funkcja losowa, są:
- gęstość widmowa mocy sygnału obciążenia dynamicznego sekcji,
- wariancja obciążenia dynamicznego sekcji.

Wielkościami niezbędnymi do obliczenia wartości wyżej wymienionych parametrów są:
- gęstość widmowa mocy sygnału siły w stojakach, wyznaczona na postawie przebiegu czasowego siły w stojakach, zarejestrowanego w wyrobisku,
- transmitancja widmowa modelu sekcji obudowy zmechanizowanej.

Ze względu na obserwowane różnice dotyczące liczby uszkodzeń elementów sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanych dynamicznym oddziaływaniem górotworu od stropu i od spągu oraz odmienny charakter zjawisk dynamicznych zlokalizowanych w stropie i w spągu wyrobiska, w niniejszej pracy wyróżniono dwa rodzaje obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej:
- obciążenie dynamiczne działające na sekcję od stropu,
- obciążenie dynamiczne działające na sekcję od spągu.

W związku z powyższym rozpatrywano dwa modele fizyczne sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej wyróżnionym dwom rodzajom obciążenia dynamicznego. Wartości parametrów tych modeli uzależnione są od:
- zredukowanej masy sekcji obudowy zmechanizowanej,
- sprężystości stojaków,
- masy bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu,
- częstości własnych oraz współczynników tłumienia sekcji.

Wyżej wymienione wielkości określono korzystając z wyników pomiarów wykonanych w wyrobisku.

Podstawowym źródłem informacji służących w niniejszej pracy do identyfikacji parametrów obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej są wyniki pomiarów wykonanych w wyrobisku. Pomiary obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej przygotowano i przeprowadzono w wybranych wyrobiskach ścianowych charakteryzujących się III stopniem zagrożenia tąpaniami, postępując zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 5.1. Polegały one na równoczesnej rejestracji przebiegów czasowych siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy. W trakcie długotrwałych pomiarów wykonywanych w wyrobisku potwierdzono dobre właściwości funkcjonalne i trwałościowe specjalistycznej aparatury pomiarowej, zaprojektowanej i wykonanej w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej.

W wyniku długotrwałych pomiarów dołowych uzyskano 27 serii pomiarowych zawierających równocześnie zarejestrowane przebiegi czasowe: siły w stojakach i przyspieszenia stropnicy oraz 10 serii pomiarowych zawierających tylko przebiegi czasowe siły w stojakach. Wyniki pomiarów siły w stojakach oraz przyspieszenia stropnicy, zrealizowane w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu, zostały wykorzystano w niniejszej pracy w trzech aspektach:

- analizy wpływu czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji na parametry charakteryzujące zmianę siły w stojakach spowodowaną obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej.
- oszacowania energii przejętej przez stojaki sekcji oraz przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń charakteryzujących zaciskanie wyrobiska spowodowane dynamicznym oddziaływaniem górotworu na sekcję obudowy zmechanizowanej,
- zebrania danych umożliwiających identyfikację parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanych dynamicznemu oddziaływaniu górotworu,

W niniejszej pracy rozpatrzono następujące czynniki determinujące obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji:

- warunki statycznej współpracy sekcji obudowy zmechanizowanej z górotworem, a w szczególności wartość statycznej siły w stojakach,
- rodzaj dynamicznego oddziaływania górotworu, a w szczególności:
  - zwrot obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej,
  - rodzaj strzelania wykonywanego w wyrobisku,
  - energię wstrząsu towarzyszącego zarejestrowanym zmianom siły w stojakach oraz lokalizację ogniska tego wstrząsu,
  - gęstość energii sejsmicznej fali poprzecznej w miejscu pomiarów.

Stwierdzono istnienie silnej zależności korelacyjnej pomiędzy wartością maksymalnej siły w stojakach F_m a początkową statyczną siłą w stojakach F_{stp}. Występuje ona w przypadku zmian siły w stojakach spowodowanych działaniem obciążenia dynamicznego zarówno na stropnice, jak i na spągnice sekcji. Z dotychczas przeprowadzonych pomiarów dołowych wynika, że maksymalna wartość współczynnika przyrostu obciążenia wynosi:
K_d = 1,80 dla przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu,
K_d = 1,23 przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od stropu.

W przypadku większości zarejestrowanych przypadków obciążenia dynamicznego sekcji obudowy zmechanizowanej energia sprężysta przejęta przez stojaki jest ponad 30-krotnie większa od energii fali sejsmicznej działającej na powierzchnię stropnicy. Wynika stąd, że źródłem energii działającej na sekcję nie jest sama fala sejsmiczna, lecz zmiany w stropie bezpośrednim spowodowane przejściem fali sejsmicznej przez górotwór naruszony. Korzystając z zarejestrowanych przebiegów czasowych wypadkowej siły w stojakach, oszacowano również wartości: przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia, charakteryzujących zaciskanie wyrobiska w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu.

Analizując gęstości widmowe mocy sygnałów siły, zarejestrowane podczas dynamicznego oddziaływania górotworu, zarówno na stropnicę, jak i na spągnice sekcji, stwierdzono, że charakteryzuje je jedno wyraźne maksimum występujące w paśmie częstości 24,5 ÷ 73,5 rad·s^{-1}, a więc przy częstości mniejszej od pierwszej częstości własnej sekcji obudowy zmechanizowanej.

Pomiary wypadkowej siły w stojakach oraz przyspieszenia stropnicy wykorzystano również do identyfikacji parametrów modeli sekcji obudowy zmechanizowanej poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu. Oszacowano masę bryły stropowej działającej na sekcję w warunkach dynamicznego oddziaływania górotworu. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 6.14. Analiza modeli autoregresyjnych sygnału przyspieszenia stropnicy umożliwiła wyznaczenie parametrów modalnych sekcji obudowy zmechanizowanej rozpartej w wyrobisku i poddanej dynamicznemu oddziaływaniu górotworu.

Zidentyfikowano parametry modeli fizycznych, charakteryzujących się największą zgodnością modułu transmitancji widmowej modelu, z wartością średnią modułu transmitancji widmowej, wyznaczoną na podstawie wyników pomiarów dołowych. Przedstawiają je rys. 7.8 i 7.15. W załączniku do niniejszej pracy przedstawiono przykłady wykorzystania tych modeli do symulacji przebiegów czasowych wypadkowej siły w stojakach spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji obudowy zmechanizowanej o założonej charakterystyce czasowej.

Wykresy gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego sekcji wyznaczone dla przebiegów czasowych zmian siły w stojakach, zarejestrowanych w poszczególnych seriach pomiarowych, znacznie różnią się od siebie. Zebrane dotychczas wyniki pomiarów zmian siły w stojakach, spowodowanych obciążeniem dynamicznym sekcji od stropu, upoważniają jedynie do stwierdzenia, że maksimum gęstości widmowej mocy obciążenia dynamicznego występuje przy częstości 24,5 rad·s^{-1} dla obciążeń dynamicznych spowodowanych zarówno strzelaniem, jak i samoistnymi zjawiskami powstałymi w górotworze.

Poszukując związków pomiędzy parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji obudowy zmechanizowanej, traktowane jako zmienna losowa, a czynnikami determinującymi obciążenie statyczne i dynamiczne działające na sekcję rozpartą w wyrobisku stwierdzono, że w przypadku samoistnych wstrząsów górotworu towarzyszących obciążeniu dynamicznemu sekcji, działającemu zarówno od strony stropu, jak i od strony spągu, istnieje zależność korelacyjna pomiędzy wariancją δ_z^2 obciążenia dynamicznego sekcji a parametrami K_d lub F_{stp} charakteryzującymi przebieg czasowy wypadkowej siły w stojakach opisana nieliniowymi funkcjami regresji (7.10) i (7.12).

Analizując pojedyncze serie pomiarowe stwierdzono, że dynamiczne oddziaływanie górotworu od strony spągu węglowego skutkuje działaniem na sekcję obciążenia dynamicznego o większej gęstości widmowej mocy sygnału oraz o większej wariancji, w porównaniu z analogicznymi parametrami charakteryzującymi obciążenie dynamiczne sekcji od strony spągu łupkowego. Wyniki pomiarów przeprowadzonych dotychczas nie upoważniają do sformułowania innych wniosków odnośnie do wpływu czynników determinujących obciążenie statyczne i dynamiczne sekcji na wariancję obciążenia dynamicznego sekcji, czy też na gęstość widmową mocy sygnału tego obciążenia.

Dotyczy to szczególnie przypadków obciążenia dynamicznego działającego na sekcję od spągu. Analiza wyników pomiarów sił w stojakach spowodowanych takim właśnie obciążeniem zewnętrznym wskazuje na potrzebę przeprowadzania dalszych pomiarów obciążenia sekcji obudowy zmechanizowanej spowodowanego dynamicznym oddziaływaniem górotworu na spągnice, szczególnie w tych wyrobiskach zagrożonych tąpaniami, które prowadzone są po spągu węglowym.

Identification of parameters characterizing the dynamic load of the powered roof support unit caused by the dynamic action of the rock body

Abstract

From results of the underground tests, that have been performed so far, from the analysis of theories describing geomechanical conditions, which precede the occurrence of a bump, as well as from the interpretation of failures of elements of a powered roof support unit caused by bumps it appears that measurements of parameters characterizing the dynamic load on a powered roof support unit set in an underground working exposed to bumping must be carried out.

In this paper – a dynamic load on a powered roof support unit – is defined as a time varying force coming from the rock body and acting on a longwall support unit in consequence of the rock body dynamic action. The objective of the paper is to identify parameters which characterize dynamic action of the rock body on a canopy or on a base of a powered roof support unit producing changes of the force in legs, the rise time of which is longer than 0.01 s with its average rate of increase being at least by 25% greater than the maximal value of a rate of the force rise in legs caused by setting of a support unit. The identification covers the following parameters characterizing the dynamic load acting on a powered roof support unit which is treated as a random function:

- spectral density of power of the dynamic load ac ting on a support unit,
- variance of the dynamic load acting on a support unit.

The above named parameters can be calculated with these quantities being known:

- spectral density of power of the force in legs, determined on the ground of a time course of the force in legs, as recorded in an underground working,
- spectral transmittance of a model of a powered roof support unit.

In view of the observed differences in a number of failures of elements of a support unit caused by dynamic action of the rock body exerted from the roof and by that exerted from the floor and in consideration of different characters of dynamic phenomena occurring in the roof and in the floor of an underground working, there are two kinds of dynamic load acting on a powered roof support unit distinguished in this paper:

- dynamic load acting on a support unit from the roof,
- dynamic load acting on a support unit from the floor.

This being so, two physical models of a powered roof support unit subjected to the action of the two distinguished kinds of dynamic load have been considered. Values of parameters of these models depend on:

- reduced mass of a powered roof support unit,
- elasticity of legs,
- mass of a roof rock block acting on a support unit under conditions of dynamic action of the rock body,
- natural frequencies and damping coefficients of a support unit.

The above named quantities have been determined when making use of results of the measurement carried out in the underground working.

The measurements taken in the underground working provided the basis of information which allowed parameters of the dynamic load acting on a powered roof support unit to be identified. Measurements of the dynamic load acting on a powered roof support unit were planned and effected on selected longwall faces, where bump hazard is classified as III degree. The measurements were carried out according to the methodology presented in the section 5.1 and consisted in recording of time courses of forces in legs and of the acceleration of a canopy at the same time.

The long lasting measurements taken in underground workings confirmed good functional and mechanical properties of the special measuring apparatus designed and made at the Institute of Mining Mechanization of the Silesian Technical University.

The long lasting underground measurements brought about 27 measuring series which embraced time courses of forces in legs and accelerations of a canopy recorded at the same time as well as 10 measuring series which included time courses of the force in legs only. Results of the measurements of forces in legs and of accelerations of a canopy, carried out under conditions of dynamic action of the rock body, were employed in this paper in three aspects:

- to analyse the effect which factors determining the static and dynamic load acting on a support unit have on parameters characterizing the change of a force in legs caused by the dynamic load on a support unit;
- to estimate the energy taken up by legs of a support unit as well as displacements, speeds and accelerations characterizing the convergence of the underground working due to dynamic action of the rock body exerted on a powered roof support unit;
- to acquire data which allow parameters of models of a powered roof support unit subjected to dynamic action of the rock body to be identified.

· The following factors determining the static and dynamic load on a support unit have been considered in this paper:

- conditions of static cooperation of a powered roof support unit with the rock body and, especially, a value of the static force in legs;
- kind of dynamic load acting on a powered roof support unit and, in particular,:
  - sense of the dynamic load acting on a powered roof support unit,
  - type of blasting applied in an underground working,
  - bump energy associated with the recorded changes in forces in legs as well as location of a focus of the bump,
  - energy density of a transverse seismic wave in the measuring point.

It has been found that there is a significant correlation between the maximal value of force in legs – F_m and the initial static force in legs – $F_{st,p}$. The correlation takes place when the force in legs is changed due to the action of dynamic load exerted both on a canopy and on a base of the support unit. From the underground measurements, that have been carried out so far, it appears that the maximal value of a coefficient of load increase is:
$K_d = 1.80$ in case of dynamic load acting on a support unit from the floor,
$K_d = 1.23$ in case of dynamic load acting on a support unit from the roof.

In most of the recorded cases of dynamic loads exerted on a powered roof support unit, the elastic strain energy taken up by legs is more than 30 times greater than the energy of a seismic wave acting on the canopy surface. This shows that a source of the energy acting on the support unit is not to be attributed to a seismic wave itself, but is involved in changes

taking place in the immediate roof in consequence of the passage of a seismic wave throughout the rock body affected by working. When making use of the recorded time courses of the resultant force in legs, values of such quantities as displacement, speed and acceleration, characterizing the convergence of an underground working under conditions of dynamic action of the rock body have been estimated as well.

An analysis of the power spectrum of force signals, as recorded during dynamic action of the rock body exerted both on a canopy and on a base of the support unit, has enabled to state that all spectra are characterized in that they have one distinct maximum in the frequency band $24.5 \div 73.5$ rad·s^{-1}, also at the frequency lower than the first natural frequency of the powered roof support unit.

Measurements of the resultant force in legs and of acceleration of a canopy were utilized to identify parameters of models of a powered roof support unit exposed to dynamic action of the rock body. The mass of roof rock block acting on the support unit under conditions of dynamic action of the rock body was also estimated. Results of the calculations are presented in the Table 6.14. The analysis of regression models of a signal of the canopy acceleration made it possible to determine modal parameters of a powered roof support unit set in an underground working and subjected to dynamic action of the rock body.

Parameters of physical models, characterized by the highest consistence of spectral transmittance of the model with the mean value of spectral transmittance, determined on the basis of results of the underground measurements, have been identified. They are presented in figures 7.8 and 7.15. The annexe to this paper describes examples of employing of these models to simulate time courses of the resultant force in legs caused by the dynamic load acting on a powered roof support unit of the assumed time characteristic.

Diagrams of spectral density of power of the dynamic load acting on a support unit, determined for time courses of changes of the force in legs, recorded in particular measuring series, considerably differ one from another. Results of the measurements of changes of the force in legs produced by dynamic load exerted on a support unit and coming from the roof, which have been acquired so far, provide the basis for stating that the maximum of power spectral density of the dynamic load occurs at the frequency of 24.5 rad·s^{-1}, both in case of dynamic loads produced by blasting and in case of dynamic loads caused by spontaneous phenomena taking place in the rock body.

When searching for relationships between parameters, which characterize the dynamic load acting on a powered roof support unit, treated as a random variable, and factors being determinant of a static load and a dynamic load acting on a support unit set in an underground working, it has been found that in case of spontaneous bumps in the rock body associated with the dynamic load acting on a support unit and coming both from the roof and from the floor, there is a correlation between a variance of the dynamic load on the support unit δ_z^2 and parameters characterizing the time course of the resultant force in legs – K_d or $F_{st\,p}$ – described by non-linear regression functions (7.10) and (7.12).

· From an analysis of individual measuring series it follows that dynamic action of the rock body coming from the coal floor results in that a support unit is subjected to action of a dynamic load of greater spectral density of power and of greater variance in comparison with analogous parameters characterizing a dynamic load acting on a support unit and coming from the shaly floor. Results of the measurements carried out so far do not give grounds

to formulate other conclusions concerning the effect which factors determining a static load and a dynamic load acting on a support unit have on a variance of the dynamic load or on the power spectral density of this load.

In particular, this refers to cases of a dynamic load acting on a support unit and coming from the floor. An analysis of results of the measurements of forces in legs generated by such an external load shows that it is necessary to take further measurements of a load acting on a support unit due to dynamic action of the rock body exerted on a base advanced over the coal floor, especially when the support unit is operated in underground workings exposed to bump hazards.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel.(0-32) 237-13-81
http://wydawnictwo.polsl.pl

Sprzedaż i Marketing
tel. (0-32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Nakł. 100+50 Ark. wyd. 15 Ark. druk. 11,875 Papier offset. 70x100, 80 g
Oddano do druku 17.11.04 r. Podpisano do druku 17.11.04 r. Druk ukończ. w listopadzie 2004 r.

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, ul. Kujawska 1
zam. 396/04

Książki Wydawnictwa można nabyć w księgarniach

GLIWICE

- Punkt Sprzedaży – ul. Akademicka 2 (237-17-87)
- „FORMAT" – Akademicka 5 (architektura i budownictwo)
- „LAMBDA" – ul. Akademicka 2 (237-21-40)
- Punkt Sprzedaży – ul. Akademicka 16 (automatyka, elektronika, informatyka)
- „ŻAK" – ul. Kaszubska

RYBNIK

- „ORBITA" – ul. Rynek 12
- „NEMEZIS" – ul. Hallera 26

ŁÓDŹ

- „POLITECHNIKA 100" – ul. Żeromskiego 116 PŁ.
- Hurtownia „BIBLIOFIL" – ul. Jędrowizna 9a (042) 679-26-77

KATOWICE

- Punkt Sprzedaży – ul. Krasińskiego 8
- Hurtownia „DIK" – ul. Dulęby 7 (032) 204-82-30
- Hurtownia „JERZY" – ul. Słoneczna 24 (258-99-58)

TYCHY

- „I Ja Tours" - ul. Piłsudskiego 10 (217-00-91 w.130)

ZABRZE

- Punkt Sprzedaży – ul. Roosevelta 26

KRAKÓW

- Techniczna – ul. Podwale 4 (012) 422-48-09
- Punkt Sprzedaży WND – AGH, Al. Mickiewicza 30

GDAŃSK

- EKO-BIS – ul. Dyrekcyjna 6 (058) 305-28-53

WARSZAWA

- Studencka – Pl. Politechniki 1 (022) 628-77-58
- Techniczna - ul. Kaliskiego 15 (022) 666-98-02
- Techniczna – ul. Świętokrzyska 14
- MDM – ul. Piękna 31

BIAŁYSTOK

- Dom Książki (Księgarnia 84) – ul. Wiejska 45 c

POZNAŃ

- Księgarnia „POLITECHNIK" – ul. Piotrowo 3 (061) 665-23-24
- Księgarnia Techniczna – ul. Półwiejska 28 (061) 659-00-38

NOWY SĄCZ

- Księgarnia „ATOM" – ul. Hoffmanowej 3 (018) 446-08-72

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P.3351/04/259
Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 do 50