

Ryszard BARTNIK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA OPTIMALNEGO STEROWANIA
PROCESEM MROŻENIA GÓROTWORU

Streszczenie. W pracy przedstawiono dyskretny funkcjonal celu w procesie mrożenia górotworu. Zaproponowano również metodę rozwiązania zagadnienia optymalnego sterowania rozważanym procesem.

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

| | |
|--------------------------|--|
| a_{τ} | - współczynnik dyskontujący, |
| c | - właściwa pojemność cieplna czynnika chłodzącego, J/(kgK), |
| C_1, C_2 | - pomocnicze stałe, |
| D_w, D_2, d_w, d_z | - średnice wewnętrzne i zewnętrzne rury mrożeniowej i opadowej, m, |
| e_{el} | - wskaźnik kosztu energii elektrycznej, zł/(kWΔt), |
| E | - efekt ekonomiczny, zł, |
| f_1, f_2 | - pomocnicze stałe, |
| H | - głębokość wiercenia, m, |
| i | - pomocnicza wielkość, |
| I_m, I_p, I_r | - nakłady inwestycyjne, zł, |
| I_{mo}, I_{po}, I_{ro} | - składniki stałe nakładów inwestycyjnych, zł, |
| J_m, J_p, J_r | - przyrosty względne nakładów inwestycyjnych, zł/kW, zł/m, |
| K_{τ} | - koszty bieżące, zł, |
| n | - całkowita liczba otworów mrożeniowych, |
| n_1, n_2 | - pomocnicze stałe, |
| N | - liczba kroków programowania dynamicznego, |
| N_{τ} | - nakłady kapitałowe, zł, |
| Δp | - spadek ciśnienia, Pa, |
| \dot{Q} | - strumień ciepła, W, |
| r | - stopa dyskonta, 1/rok, |
| T_d, T_w | - temperatura chłodziwa przy dopływie i wypływie z elementu mrożeniowego, K, |

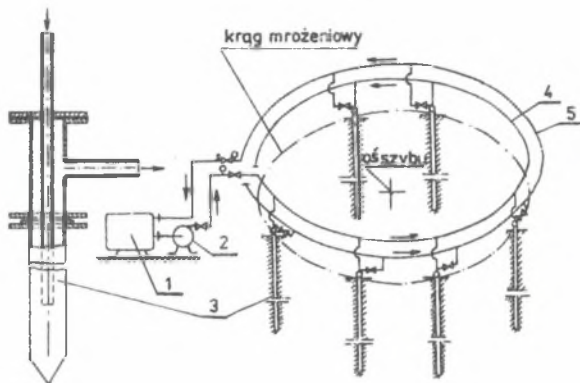
| | |
|-----------------------------|---|
| \dot{V} | - objętość strumienia chłodziwa, m^3/s , |
| w | - prędkość, m/s , |
| Δ | - symbol przyrostu, |
| ε_z | - wskaźnik energetyczny agregatu mroźniowego, |
| $\eta_{ip}, \eta_p, \eta_s$ | - sprawność wewnętrzna i całkowita pompy, oraz sprawność silnika, |
| λ_f | - liczba tarcia, |
| ν | - kinematyczny współczynnik lepkości, m^2/s , |
| ρ | - gęstość, kg/m^3 , |
| τ | - czas. |

1. WSTĘP

Przed przystąpieniem do drążenia szybów w zawodnionym górotworze, zamraża się wokół nich pierścienie o grubości płaszczka mroźniowego dochodzącego do kilku metrów. W procesie mrożenia udział agregaty mroźniowe oraz pompy chłodziwa o stosunkowo dużych, rzędu megawatów, mocach, ponoszone są duże koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne rzędu setek milionów złotych. Z uwagi na to proces mrożenia górotworu powinien być prowadzony w sposób optymalny zarówno pod względem termodynamicznym, jak i ekonomicznym.

2. OPIS PROCESU MROŻENIA GÓROTWORU

W celu zamrożenia wokół szybu górotworu, wierci się w nim na średnicy kręgu mroźniowego otwory, do których wprowadza się koronę złożoną z dwururowych elementów mroźnych, rury mroźniowej wraz z zawartą w niej rurą opadową, tworzących pojedynczy element Fielda. Rury mroźniowe i opadowe połączone są odpowiednio pierścieniowymi kolektorami (rys. 1). Przez każdy element przepływa strumień chłodziwa (zwykle wodny roztwór $CaCl_2$) o stosunkowo niskiej temperaturze od -25 do $-50^\circ C$. Solanka oziębiona w agregatach mroźniowych tłoczona jest pompami do kolektora łączącego rury opadowe i po przepłynięciu nimi w dół, a następnie w górę rurami mroźniowymi, odpływa z kolektora łączącego rury mroźniowe z powrotem do agregatów. Podczas działania urządzeń, wokół otaczających drążony szyb elementów mroźnych narasta lodowy cylinder zamrożonego górotworu (rys. 2). Wymagana grubość płaszczka mroźniowego wynika z jego warunków wytrzymałościowych. Czas zamrażania może dochodzić w zależności od parametrów górotworu do kilkunastu miesięcy. Pierścień w stanie zamrożonym można utrzymywać urządzeniami o wydajności kilkakrotnie razy mniejszej od wydajności potrzebnej podczas zamrażania.

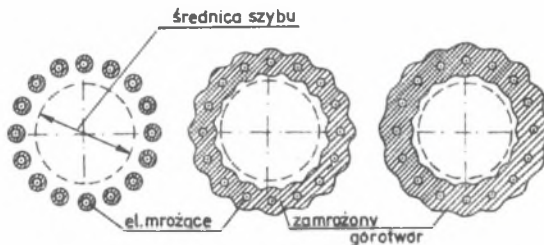


Rys. 1. Schemat instalacji do mrożenia górotworu:

1 - agregat mroźniowy, 2 - pompa chłodziwa, 3 - element mroźniowy, 4 - kolektor zasilający, 5 - kolektor odpływowy

Fig. 1. The scheme of system in the process of underground rock freezing:

1 - freezing unit, 2 - pump of cooling medium, 3 - freezing element, 4 - feeding collector, 5 - outlet collector



Rys. 2. Narastanie płaszcza mroźniowego wokół elementów mrozących

Fig. 2. The escalation of freezing jacket around of freezing elements

3. SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA OPTIMALNEGO STEROWANIA PROCESEM MROŻENIA GÓROTWORU

Proces mrożenia górotworu jest procesem zmiennym w czasie, procesem dynamicznym. Dotychczas przeprowadzono optymalizację statyczną rozważanego procesami [4]. W obliczeniach tych nie występuje parametr czasu, funkcję celu stanowi efekt ekonomiczny dla jego skończonego odcinka.

Pełne zagadnienie optymalizacji należy do dziedziny optymalizacji dynamicznej [1]. Zadanie polega na określeniu zmiennych sterowań procesu (wektora sterowań) jako funkcji czasu tak, by dany funkcjonal celu (kryterium optymalizacji) przyjmował wartość minimalną, przy spełnionych ograniczeniach na sterowania, definiujących ich domknięty dopuszczalny obszar.

Wyznaczone optymalne funkcje sterowania wytyczają optymalną "trajektorię" prowadzenia rozważanego procesu. Funkcjonał celu zawiera również zmienne decyzyjne statyczne związane z realizacją procesu. Przeprowadzenie wielowariantowych obliczeń ze wspomnianymi wielkościami jako parametrami pozwala również na ustalenie optymalnych wartości tych wielkości.

3.1. Określenie wektora sterowań i parametrów statycznych podlegających optymalizacji

Proces mrożenia górotworu oraz jego koszty zdeterminowane są parametrami górotworu: grubością zamrażanych warstw, ich współczynnikami przewodzenia ciepła, objętościowymi pojemnościami cieplnymi warstw, zawartością wilgoci, temperaturą naturalną i temperaturą zamrażania warstw.

Do parametrów związanych ze sposobem realizacji procesu, które powinny być optymalizowane na drodze termodynamiczno-ekonomicznej należą: współczynnik wnikania ciepła od chłodziwa do rur, średnice rury mrożeniowej i zawartej w niej rury opadowej, średnica kręgu otworów mrożeniowych i liczba otworów, strumień chłodziwa i jego temperatura minimalna, moc cieplna agregatów mrożeniowych oraz moc pomp chłodziwa. Do parametrów nie podlegających bezpośrednio optymalizacji należą współczynniki przewodzenia ciepła materiałów rur oraz współczynniki wnikania ciepła. Współczynniki przewodzenia zależą od zastosowanych materiałów podyktowanymi względami technologicznymi i wytrzymałościowymi. Współczynniki wnikania ciepła nie mają natomiast charakteru zmiennych niezależnych. Są one bowiem funkcją średnic rur, strumienia oraz rodzaju i parametrów chłodziwa. Optymalizacja dotyczy tylko jednej ze średnic rur mrożeniowych i opadowych, ponieważ grubość ścianki, a tym samym druga średnica jest, jak już wspomniano, zdeterminowana względami wytrzymałościowymi. Ponadto zewnętrzna średnica rur mrożeniowych jest ograniczona średnicą stosowanych wiertel.

Wspomniane powyżej parametry geometryczne (jedna ze średnic rury mrożeniowej i opadowej, średnica kręgu otworów mrożeniowych i liczba otworów) stanowią zbiór zmiennych decyzyjnych statycznych rozważanego procesu.

Strumień chłodziwa i jego temperatura minimalna mogą ulegać w trakcie trwania procesu mrożenia górotworu zmianom w czasie. Tworzą one zatem wektor sterowań, wektor wielkości zmiennych w czasie. Zmienne te, tak jak i zmienne statyczne, podlegają ograniczeniom. Minimalna możliwa do zastosowania temperatura chłodziwa zależy od jego rodzaju i składu, ogranicza ją również konstrukcja agregatu mrożeniowego. Strumień chłodziwa, jak również moc cieplna agregatów z uwagi na możliwość zastosowania odpowiednio dużej ich liczby nie podlegają ograniczeniom. Moc cieplna agregatów dodatkowo jest funkcją strumienia chłodziwa i jego minimalnej temperatury, nie jest zatem zmienną niezależną i tym samym nie podlega bezpośredniej optymalizacji. To samo dotyczy mocy napędowej pomp chłodziwa.

Jak już wyżej wspomniano, zagadnienie optymalizacji polega na znalezieniu takiego algorytmu zmian w czasie wektora sterowania, który zapewni optymalizację funkcjonału celu zależnego od przebiegu zmian tego wektora. Dodatkowo wielowariantowe obliczenia z wielkościami geometrycznymi rozważanego procesu jako parametrami pozwalają również na ustalenie ich optymalnych wartości.

3.2. Funkcjonał celu

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [3, 5], wyboru wariantu realizacji procesu powinno się dokonać przez maksymalizację efektu ekonomicznego obejmującego czas budowy i eksploatacji rozpatrywanej inwestycji. W przypadku procesu mrożenia górotworu, w trakcie jego zamrażania nie otrzymuje się z budowanego szybu produkcji. Minimalizacji podlega zatem suma całkowita nakładów kapitałowych N_{τ} i kosztów bieżących K_{τ} związanych z realizacją procesu, zdyskontowana na moment uzyskania przez płaszcz mrożeniowy żądanej grubości.

Suma ta wyraża się wzorem:

$$E = \sum_{\tau=0}^N a_{\tau} (N_{\tau} + K_{\tau}) = \min. \quad (1)$$

Współczynnik dyskontujący, odniesiony do chwili N otrzymania przez płaszcz mrożeniowy żądanej grubości, określony jest wzorem:

$$a_{\tau} = (1 + r_{\Delta\tau})^{N-\tau}. \quad (2)$$

Stopę dyskontową $r_{\Delta\tau}$ wylicza się (celem określenia współczynnika a_{τ} umożliwiającego prowadzenie rachunku dyskonta dla dowolnego przedziału czasu $\Delta\tau$) z równania:

$$1 + r = (1 + r_{\Delta\tau})^{i\Delta\tau}, \quad (3)$$

gdzie wysokość przyjętej obecnie w Polsce rocznej stopy procentowej r wynosi 0,08, mnożnik i jest natomiast krotnością przyjętego do obliczeń interwału czasu $\Delta\tau$ w roku. Przedział $\Delta\tau$ dla procesów dyskretnych może być ograniczony sposobem podziału na elementy różnicowe oraz żądaną dokładnością obliczeń.

Koszty bieżące K_{τ} uwzględniają koszty energii elektrycznej do napędu agregatów mrozeniowych oraz pomp chłodziwa. Koszty te, zdyskontowane na moment zakończenia mrożenia, wyrażone są zależnością:

$$\sum_{\tau=0}^N a_{\tau} K_{\tau} = \sum_{\tau=0}^N \left[1,25 n \dot{v}_{\tau+1} \Delta p_{\tau+1} \left(\frac{1}{\eta_p \eta_{s_1}} + \frac{1}{\eta_{ip} \eta_{s_2} \varepsilon_z} \right) + \right. \\ \left. + 1,2 n c \rho \dot{v}_{\tau+1} (T_{w\tau} - T_{d\tau+1}) \frac{1}{\eta_{s_2} \varepsilon_z} \right] e_{e1} \Delta \tau (1 + r_{\Delta \tau})^{N-\tau} \quad (4)$$

Pierwszy składnik w nawiasie kwadratowym pod znakiem sumy prawej strony równania (4) reprezentuje koszt energii elektrycznej do napędu pomp, składnik drugi i trzeci dotyczy kosztu energii elektrycznej do napędu agregatów mrozeniowych. Mnożnik 1,25 w powyższej zależności uwzględnia dodatkowe straty tarcia poza pompą oraz elementami mrozeniowymi, mnożnik 1,2 natomiast dodatkową moc cieplną (dodaną do strumienia ciepła odebranego od górotworu) dopływającą do instalacji z otoczenia, z uwagi na jej niedoskonałą izolację cieplną [4]. Wskaźnik kosztu energii elektrycznej e_{e1} odniesiony jest do przedziału czasu $\Delta \tau$. Wskaźnik energetyczny agregatów mrozeniowych ε , sprawność wewnętrzna η_{ip} i całkowita η_p pomp oraz sprawność silników elektrycznych η_s również mogą ulegać zmianom w czasie, w zależności od zmian wydajności i mocy tych urządzeń. Wykorzystując ich statyczne charakterystyki pracy, można zmianę wartości tych wskaźników w trakcie numerycznych obliczeń odpowiednio korygować. Również odpowiednio korygować można wraz ze zmianą temperatury chłodziwa zmianę wartości jego gęstości ρ , właściwej pojemności cieplnej c oraz kinematycznego współczynnika lepkości ν . Wywołana tarciem strata ciśnienia dla pojedynczego elementu mrozeniowego wyraża się wzorem:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho H (\lambda_{f1} w_1^2 \frac{1}{d_w} + \lambda_{f2} w_2^2 \frac{1}{D_w - d_z}), \quad (5)$$

gdzie:

$$\lambda_{f1} = \frac{C_1}{\left(\frac{w_1 d_w}{\nu} \right)^{n_1}}, \quad \lambda_{f2} = \frac{C_2}{\left[\frac{w_2 (D_w - d_z)}{\nu} \right]^{n_2}}, \quad (6)$$

$$w_1 = \frac{4 \dot{v}}{\pi d_w^2}, \quad w_2 = \frac{4 \dot{v}}{\pi (D_w^2 - d_z^2)}. \quad (7)$$

Indeksy 1 i 2 we wzorach (5), (6), (7) odnoszą się kolejno do rury opadowej i przestrzeni międzyrurowej. Wartości stałych $C_{1,2}$ i $n_{1,2}$ we wzorach (6) zależą od charakteru przepływu chłodziwa w rurze opadowej i przestrzeni międzyrurowej.

Nakłady kapitałowe N_T obejmują nakłady inwestycyjne poniesione na agregaty mrozeniowe, pompy chłodziwa oraz elementy mrozeniowe składające się z rur mrozeniowych i opadowych. Zgodnie z ogólną tendencją [5], przyjęto je kolejno jako liniowe funkcje ich mocy cieplnych, mocy napędowych oraz całkowitej długości rur. Wyrażają je następujące zależności:

- dla agregatów mrozeniowych:

$$J_m = J_{mo} + J_m \dot{Q}, \quad (8)$$

gdzie moc cieplna równa się

$$\dot{Q} = 1,2 n_{oc} \dot{V}(T_w - T_d) + 1,25 n \frac{\dot{V} \Delta p}{\eta_{ip}}, \quad (9)$$

- dla pomp chłodziwa:

$$J_p = J_{po} + J_p \frac{1,25 n \dot{V} \Delta p}{\eta_p \eta_{s1}}, \quad (10)$$

- kolejno dla rur mrozeniowych i opadowych:

$$J_{rm} = J_{rmo} + j_{rm} 1,125 nH, \quad (11)$$

$$J_{ro} = J_{roo} + j_{ro} 1,125 nH, \quad (12)$$

przy czym przyrosty względne nakładów inwestycyjnych j_{rm} oraz j_{ro} w odniesieniu do jednostki długości rury zależą od średnicy rur zgodnie z zależnością [5]:

$$j_r = f_1 + f_2 D^2. \quad (13)$$

Mnożniki 1,2 i 1,25 we wzorach (9) i (10) spełniają taką rolę, jak uprzednio w równaniu (4). Mnożniki 1,125 w równaniach (11) i (12) uwzględniają nakłady inwestycyjne ponoszone na pierścieniowe kolektory łączące rury mrozeniowe i opadowe oraz rury łączące je z agregatami mrozeniowymi oraz pompami chłodziwa. W praktyce nakłady te wynoszą około 25% nakładów ponoszonych na elementy mrozeniowe [4]. Nakłady inwestycyjne na agregaty mrozeniowe i pompy chłodziwa są funkcjami czasu z uwagi na zmienny w czasie

strumień ciepła Q oraz zmienną w czasie moc napędową pomp. W celu zdyskontowania ich na moment otrzymania przez płaszcz mrozeniowy żądanej grubości, można je przedstawić w postaci sumy nakładów poniesionych w chwili początkowej $\tau = 0$ oraz przyrostów w poszczególnych przedziałach czasu $\Delta\tau$.

Po wykorzystaniu powyższej uwagi oraz wzorów (8) - (12) nakłady kapitałowe procesu mrożenia górotworu, zdyskontowane na chwilę zakończenia mrożenia, można wyrazić zależnością:

$$\sum_{\tau=0}^N a_{\tau} N_{\tau} = \left[J_m + J_p + J_{rm} + J_{ro} \right]_{\tau=0} \cdot (1 + r_{\Delta\tau})^N +$$

$$+ \sum_{\tau=1}^N \left[\left(\frac{\partial J_m}{\partial \dot{V}_{\tau-1}} \right) \Delta \dot{V} + \left(\frac{\partial J_m}{\partial T_d} \right)_{\tau-1} \Delta T_d + \left(\frac{\partial J_o}{\partial \dot{V}_{\tau-1}} \right) \Delta \dot{V} + \right. \quad (14)$$

$$\left. + \left(\frac{\partial J_m}{\partial T_w} \right)_{\tau-1} \Delta T_w \right] (1 + r_{\Delta\tau})^{N-\tau},$$

gdzie przyrosty strumienia chłodziwa i jego minimalnej temperatury wynoszą:

$$\Delta \dot{V} = \dot{V}_{\tau+1} - \dot{V}_{\tau}, \quad \Delta T_d = T_{d\tau+1} - T_{d\tau}. \quad (15)$$

Po obliczeniu pochodnych cząstkowych ze wzoru (14) wykorzystując równania (5) - (7), (8) - (10) i następnie po podstawieniu zależności (4) i (14) do (1) oraz po pominięciu wyrazów stałych J_{mo} , J_{po} , J_{rmo} , J_{roo} otrzymuje się w dyskretnym zapisie poszukiwany funkcjonał celu:

$$E = \left\{ \left(\frac{e_{e1} \Delta\tau + j_p}{\eta_p \eta_{s1}} + \frac{e_{e1} \Delta\tau}{\eta_{ip} \eta_{s2} \epsilon_z} + \frac{j_m}{\eta_{ip}} \right) (A \dot{V}_1^{3-n_1} + B \dot{V}_1^{3-n_2} + \right.$$

$$+ 1,2n \varphi \left(\frac{e_{e1} \Delta\tau}{\eta_{s2} \epsilon_z} + j_m \right) \cdot \dot{V}_1 (T_{wo} - T_{\alpha 1}) +$$

$$+ 1,125 nH \left[2f_1 + f_2 (D_z^2 + d_z^2) \right] \left. \right\} (1 + r_{\Delta\tau})^N + \sum_{\tau=1}^N \left\{ \left(\frac{e_{e1} \Delta\tau}{\eta_p \eta_{s1}} + \right.$$

$$\left. + \frac{e_{e1} \Delta\tau}{\eta_{ip} \eta_{s2} \epsilon_z} \right) (A \dot{V}_{\tau+1}^{3-n_1} + B \dot{V}_{\tau+1}^{3-n_2}) + 1,2 n c \varphi \frac{e_{e1} \Delta\tau}{\eta_{s2} \epsilon_z} \dot{V}_{\tau+1} (T_{w\tau} - T_{d\tau+1}) + \right. \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
& + \left[1,2 \text{ n} \rho c J_m (T_w \tau_{-1} - T_d \tau) + \left(\frac{J_m}{\eta_{1p}} + \frac{J_g}{\eta_p \eta_{s1}} \right) (A(3-n_1) \dot{V}_\tau^{2-n_1} + \right. \\
& \left. + B(3-n_2) \dot{V}_\tau^{2-n_2} \right] \cdot (\dot{V}_{\tau+1} - \dot{V}_\tau) - 1,2 \text{ n} \rho c J_m \dot{V}_\tau (T_d \tau_{+1} - T_d \tau) \Big\} (1+r \Delta \tau)^{N_\tau}, \quad (16)
\end{aligned}$$

gdzie:

$$A = \frac{1,25 \text{ n}}{2} \rho \text{ HC}_1 \sqrt{\nu}^{n_1} d_w^{n_1-5} (4/\pi)^{2-n_1},$$

$$B = \frac{1,25 \text{ n}}{2} \rho \text{ HC}_2 \sqrt{\nu}^{n_2} (D_w - d_z)^{-3} (D_w + d_z)^{n_2-2} (4/\pi)^{2-n_2}.$$

4. METODA ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA OPTIMALIZACJI DYNAMICZNEJ PROCESU MROŻENIA GÓROTWORU

Rozwiązanie rozważanego zagadnienia wariacyjnego dogodnie jest przeprowadzić w przypadku procesu dyskretnego opierając się na zasadzie optymalności Bellmana [2], wykorzystując zaprezentowany w pracy [4] dyskretny model matematyczny procesu. Model ten stanowi układ równań stanu, równań różnicowych temperatur otrzymanych za pomocą bilansów energii sporządzonych dla każdego elementu różnicowego górotworu i rur mrożeniowych i opadowych.

Zasada optymalności mówi, że w dowolnym momencie optymalna strategia jest określona całkowicie odpowiadającymi temu momentowi warunkami początkowymi i nie zależy od sposobu, w jaki układ do tych warunków został doprowadzony [1]. Tym samym zasada ta umożliwi optymalizację dla poszczególnych przedziałów czasu $\Delta \tau$ niezależnie. Sprowadza zadanie optymalizacji dynamicznej do szeregu kolejnych zadań poszukiwania minimum funkcji o liczbie zmiennych niezależnych równej liczbie sterowań.

Zasada optymalności prowadzi do następującego wzoru rekurencyjnego z rekurencją przednią [2]:

$$S(\tau, \mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}(\tau)} \left\{ f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}(\tau)) + S(\tau-1)[f(\mathbf{x}, \mathbf{u}(\tau))] \right\} = 2, \dots, N, \quad (17)$$

$$S(1, \mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}(1)} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}(1)),$$

gdzie minima względem $\mathbf{u}(\tau)$ wyznaczane są zgodnie z danymi ograniczeniami, N jest liczbą uwzględnianych kroków programowania dynamicznego. Symbol S oznacza minimum funkcjonau celu. Dla przejrzystości zapisu w równaniach Bellmana (17) przyjęto oznaczenia ogólnie stosowane w literaturze, symbol

u oznacza wektor sterowań, symbol x wektor stanu, funkcjonal celu (16) oznaczony jest symbolem Q i dany ogólnym wzorem

$$Q = \sum_{\tau=0}^N f_0[x(\tau), u(\tau+1)] , \quad (18)$$

równania stanu opisane są zależnością:

$$x(\tau+1) = f[x(\tau), u(\tau+1)] , \quad (19)$$

gdzie zmienna sterowania $u(\tau+1)$ definiuje ciąg decyzji zmieniających τ -ty stan układu w stan $(\tau+1)$ -szy. Numeryczne rozwiązanie równania funkcyjnego (17) jest równoznaczne z krokowym konstruowaniem klasy optymalnych strategii dla wielu stanów początkowych. Znalezione rozwiązanie jest szukanym optymalnym algorytmem zmian w czasie wektora sterowań. Obliczenia kończą się po osiągnięciu przez płaszczyznę mrozeniową wymaganej grubości.

5. UWAGI KOŃCOWE

Numeryczna realizacja algorytmu zaproponowanej bezpośredniej metody programowania dynamicznego rozwiązania zagadnienia optymalizacji dynamicznej procesu mrożenia górotworu wymaga stosunkowo dużych nakładów czasu maszynowego oraz stosunkowo dużej pojemności pamięci operacyjnej maszyny cyfrowe [1, 2]. Związane jest to z koniecznością wyznaczania sterowania optymalnego jako funkcji stanu na każdym etapie, a więc przeprowadzania obliczeń dla każdej przewidywanej wartości stanu układu, wynikającej z równań różnicowych (19) z [4] dla kolejnych przedziałów czasu. Obecne możliwości techniki obliczeniowej, jej dostępność powodują jednak, że ograniczenia te nie są już tak istotne. Ponadto zaletą tej metody jest prostota i przejrzystość algorytmu.

LITERATURA

- [1] FINDEISEN W., SZYMANOWSKI J., WIERZBICKI A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN, Warszawa 1980
- [2] ŁAWRYNOWICZ J.: Rachunek wariacyjny ze wstępem do programowania matematycznego, WNT, Warszawa 1977.
- [3] Ocena ekonomicznej efektywności inwestycji i innych zamierzeń rozwojowych. Zbiór przepisów, PWE, Warszawa 1974.
- [4] SKŁADZIEN J.: Analiza cieplna i ekonomiczna mrożenia górotworu, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Energetyka z. 78, Gliwice 1981 (praca habilitacyjna).

- [5] SZARGUT J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej, WNT, Warszawa 1983.

Rencenzent:

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Kalinowski

ФОРМУЛИРОВКА ВОПРОСА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Р е з ю м е

В работе представляется дискретный функционал цели в процессе замораживания горных пород. Предлагается тоже метод решения проблемы оптимального управления этим процессом.

A FORMULATE OF OPTIMAL CONTROL PROBLEM OF UNDERGROUND ROCK FREEZING

S u m m a r y

A discrete functional of purpose in the process of underground rock freezing has been presented in the paper. Also a method of solving the problem of the optimal control of the process under consideration has been suggested.