

Teoretické hľadiská pre vývoj software riadiaceho systému vrtnej technológie

Ján Bejda & Viera Miklúšová¹

Theoretical aspects for the design software of drive system in the drilling technology

There is defined the function of expence optimization of drilling in a ground massif in the work. It is possible to rewrite the cost optimization formula of Waller and Rowsell to the formula

$$C = (B + R T_m H) k_A A E + \frac{R}{P} ,$$

where

C - costs related to the current meter of the drilling, [Sk.m⁻¹],

B - additional drilling costs, [Sk],

R - direct drilling costs recalculated on the time unit, [Sk.h⁻¹],

T_m - time loss recalculated on the length unit, [h.m⁻¹],

H - the depth in which the process is realized in the case of the deep drilling, [m],

A - rockmass abrasivity, [mm.m⁻¹],

E - specific energy of cutt-off, [J.m⁻³],

k_A - constant,

P - penetration rate, [m.h⁻¹],

where P is formulated in the form

$$P(L) = P_o e^{k_E E(L) L} ,$$

where

P_o - starting penetration rate with unworn tool, [m.h⁻¹],

L - currently drilled depth or the length with the newly mounted tool until its worn out, [m],

k_E - constant.

Using this formulas it is possible to formulate the criterion to control the drilling process in ground from the viewpoint of minimizing the expences of drilling for the linear meter in the form

$$L_{opt}^2 = - \frac{B + R T_m H}{R k_E k_L} \left(\frac{P}{E} \right)_{max} ,$$

where

L_{opt} - the optimum drilled length with the tool from the point of the criteria of the minimum costs for the current drill meter under the drilling parameters,

$(P/E)_{max}$ - criterion for the design software of drive automat in the drilling technology,

k_L - constant.

Key words: costs of drilling, minimal costs per meter, monitoring of drilling, penetration rate, specific energy.

Úvod

Vývoj automatizovaných systémov riadenia vrtných prác naráža na problém tvorby software, ktorý by zohľadňoval meniace sa podmienky i pri konštantných vstupných parametroch procesu. Jedná sa hlavne o možnú zmenu víťacej schopnosti nástroja v dôsledku jeho opotrebovania.

Na tieto problémy upozornili napr. Waller a Rowsell (1994). Podobne ako Sitnikov (1992), Wijk (1991) a Krúpa (1999) pre tvorbu uvedeného software navrhli funkcie, vychádzajúce z kritéria riadenia vrtného procesu z hľadiska minimalizácie nákladov na víťanie, prepočítaných na bežný meter vrtu. Iný postup optimalizácie naftového víťania uvádza Johnston (1995). Tento postup je založený hlavne na štatistickom spracovaní monitorovaných veličín, získaných z realizovaných 4000 naftových vrtov od roku 1952 do roku 1995.

V prácach (Bejda, 1993) a (Miklúšová, 1997) sme poukázali na netradičný prístup k riešeniu uvedenej problematiky, ktorý za predpokladu, že sa pri realizácii vrtov zabezpečí spojitú monitorovanie riadiacich parametrov víťania, ako sú okamžitá rýchlosť víťania a špecifická energia rozpojovania, umožní vypracovať riadiace kritériá, ktoré zohľadnia i meniacu sa víťateľnosť horniny a víťaciu schopnosť nástroja.

V práci (Bejda, 1993) bol tento problém riešený za predpokladu, že veličina špecifickej energie rozpojovania sa buď nemení alebo mení podľa vzťahu vopred implementovaného v programe. V práci (Miklúšová, 1997) bol tento problém riešený pre naftové víťanie.

¹RNDr. Ján Bejda, PhD. a Mgr. Viera Miklúšová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice (Recenzované v roku 2000)

Wijk (1991) navrhol pre vyjadrenie okamžitej rýchlosti vrtania P vzťah

$$P = P_0 n S_c^4 \left(\frac{F}{D \sigma_{RD}} \right)^2, \quad (1)$$

pričom

$$S_c = \frac{4 N_c}{3 \pi D^2 \sin \theta}, \quad (2)$$

kde

- P_0 - bezrozmerná experimentálna konštanta,
- D - priemer dláta, [m],
- σ_{RD} - vtláčna pevnosť, [Pa],
- N_c - počet rozpojovacích elementov na dláte,
- F - osový prítlak, [N],
- n - otáčky, [s^{-1}].

Pre bežné typy dlát je $2\theta \cong 75^\circ$, takže $S_c = 0,7 N_c D^{-2}$.

Podľa Reeda (1972), vplyv opotrebovania nástroja možno zohľadniť, ak sa namiesto konštanty P_0 zavedie vzťah

$$P_0 = \frac{\overline{P_0}}{1 - k_1 k_2}, \quad (3)$$

kde

- $\overline{P_0}$ - je počiatočná experimentálna konštanta pri vrtaní s novým nástrojom,
- k_1, k_2 - iné experimentálne konštanty.

Vo vzťahoch (1) – (3) nie je definovaná možnosť zohľadnenia zmeny vrtateľnosti horniny, predpokladá sa tiež znalosť hodnoty konštánt, získaných pravdepodobne zo štatistického vyhodnocovania monitorovaných veličín získaných na skôr realizovaných naftových vrtoch.

Netradičné riešenie optimalizačných kritérií vrtania

Wallerov a Rowsellov vzťah (Waller, 1994), pre nákladovú optimalizáciu navrhujeme modifikovať na tvar

$$C = U \frac{1}{L} + \frac{R}{P}, \quad (4)$$

pričom

$$U = B + R T_m H, \quad (5)$$

kde

- C - náklady na bežný meter vrtu, [$Sk.m^{-1}$],
- B - doplňujúce náklady na vrtanie, [Sk],
- R - priame vrtné náklady prepočítané na jednotku času, [$Sk.h^{-1}$],
- T_m - časové straty prepočítané na jednotku dĺžky, [$h.m^{-1}$],
- H - v prípade hĺbkového vrtania hĺbka, v ktorej sa realizuje proces, [m],
- L - priebežne odvrátaná hĺbka alebo dĺžka s novonasadeným nástrojom až do jeho opotrebenia, [m],
- P - rýchlosť samotného čistého vrtania, [$m.h^{-1}$].

Ďalej sme pre výpočet L navrhli vzťah

$$L = \frac{1}{k_A A E}, \quad (6)$$

kde

- E - špecifická energia rozpojovania, [$J.m^{-3}$],
- A - abrazivita, [$mm.m^{-1}$],
- k_A - konštanta.

Nech $L = L(t)$, t.j. skutočne odvrátaná dĺžka s novým nástrojom v čase t . To znamená, že $L \in (0, L)$ a je funkciou

$$L(t) = \frac{1}{A k_A (F, n, \sigma, \dots) E(F, n, \sigma, \dots)}, \quad (7)$$

kde σ - pevnosť horniny, [Pa].

Pre výpočet okamžitej rýchlosti vrtania so zohľadnením opotrebovania nástroja v závislosti od odvrtnu a vplyvu tohoto javu na veličinu okamžitej rýchlosti vrtania sme použili vzťah

$$P(L) = P_p e^{k_E E(L)L} \quad (8)$$

kde

P_p - počiatočná rýchlosť vrtania s neopotrebovaným nástrojom, [m.h⁻¹],
 k_E - konštanta.

Zatiaľ uvažujeme, že T_m je konštantné. Na základe vzťahov (6) a (8) a pri zohľadnení označenia (5) je možné vzťah (4) prepísať na tvar

$$C = U k_A A E + \frac{R}{P_p e^{k_E E(L)L}} \quad (9)$$

Ako vidíme, vo vzťahu (9) nevystupuje čas a všetky premenné veličiny sú iba funkciami L . Veličiny k_A a A závisia od abrazivity a vrtateľnosti hornín. V tomto štádiu považujeme i túto veličinu za konštantnú.

Na začiatku rozoberme prípad, kedy sú i parametre riadenia procesu, t.j. F a n , konštantné. Úpravou funkcie C na tvar (9) sme sa vyhlížali ťažkostiam, ktoré sú spojené s využitím optimalizačného kritéria

$$\frac{\partial C}{\partial F} = 0 \quad \text{a} \quad \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

ktoré používali napr. Wijk (1991) a Sitnikov (1992).

Náš prístup k riešeniu problému umožnil využiť ďaleko efektívnejšie optimalizačné kritérium

$$\frac{dC}{dL} = 0 \quad (11)$$

ktoré znamenalo kvalitatívny krok v hľadaní algoritmov pre on-line systém riadenia procesu z hľadiska nákladov.

Po aplikácii kritéria (11) na vzťah (4) získame výraz

$$-\frac{U}{L_{opt}^2} - \frac{R k_E \left[L \frac{dE(L)}{dL} + E(L) \right]}{P_p e^{k_E E(L)L}} = 0 \quad (12)$$

kde

L_{opt} - odvrtn, pri ktorom je možné dosiahnuť minimálne náklady pri zvolenom režime vrtania.

Nech výraz $L \frac{dE}{dL} + E$ zo vzťahu (12) spĺňa podmienku

$$L \frac{dE}{dL} + E = k_L E \quad (13)$$

kde

k_L - konštanta.

Rovnica (13) predstavuje diferenciálnu rovnicu prvého rádu, ktorá sa dá riešiť separáciou premenných, teda úpravou na tvar

$$\frac{dE}{E} = (k_L - 1) \frac{dL}{L} \quad (14)$$

Po vyriešení rovnice a po úprave výsledku dostaneme výraz

$$E(L) = k_c L^{(k_L - 1)} \quad (15)$$

kde

k_c - konštanta.

Aplikáciou rovnice (13) na rovnicu (12) a po úprave získame vzťah

$$L_{opt}^2 = -\frac{U}{R k_E k_L} \left(\frac{P}{E} \right)_{max} \quad (16)$$

Zjednodušíme tvar vzťahu (9) a upravíme ho na tvar

$$C = \frac{U P + \frac{R}{E}}{\frac{P}{E}} \quad (17)$$

Vo vzťahu (17) v menovateli vystupuje podiel funkcie okamžitej rýchlosti vrtania a špecifickej energie rozpojovania. Potom z uvedeného vzťahu vyplýva, že ak zaistíme takú reguláciu vrtania, aby sa uvedený podiel

zvyšoval, pravdepodobne bude dochádzať k znižovaniu nákladov na vrtanie. Z hľadiska riadenia vrtania je to veľmi závažný poznatok, avšak ako ukážeme ďalej, maximalizácia veličiny P/E je iba nutnou ale nie postačujúcou podmienkou na tvorbu algoritmov optimálneho riadenia procesu z hľadiska minimalizácie nákladov na vrtanie.

V skutočnosti ľahko zistíme, že ak vo vzťahu (17) rastie hodnota menovateľa, rastie aj hodnota čitateľa. Je to neurčitosť, a to znamená, že je potrebné zodpovedať otázku, čo rastie rýchlejšie, čitateľ či menovateľ.

Túto otázku sme zodpovedali v tom zmysle, že ak platí podmienka (13), potom menovateľ vo vzťahu (17) v skutočnosti rastie omnoho rýchlejšie ako čitateľ. Podmienka (13), konkretizovaná pomocou vzťahu (15), vyžaduje, aby funkcia $E(L)$ dosahovala buď konštantné hodnoty alebo menila sa monotónne.

Z hľadiska regulácie je teraz proces zjednodušený, a to tak, že automat má sledovať veličinu podielu P/E a regulovať proces tak, aby táto veličina dosahovala v každom časovom úseku maximálnu hodnotu. Zaznamenané parametre vrtania v tomto časovom úseku sú vlastne optimálne parametre vrtania pri konkrétnych vlastnostiach prevrtavanej horniny a danom stupni opotrebenia nástroja. Ak sa aspoň jedna z týchto veličín v procese vrtania zmení, dôjde i k zmene hodnoty maxima funkcie P/E. Predpokladáme, že variáciou vstupných parametrov vrtania pri využití kritéria $(P/E)_{\max}$ dosiahneme v konečnom dôsledku jednak optimálny odvrt s nástrojom, ako aj najnižšie možné náklady na vrtanie.

Aby výraz (16) viedol k racionálnemu výsledku, musí byť výraz na pravej strane vzťahu (16) kladný. Všetky veličiny vo vzťahu (16) sú kladné okrem hodnoty konštanty k_E , vystupujúcej vo vzťahu (8). Táto konštanta nadobúda zápornú hodnotu v prípade, že s opotrebovaním nástroja v závislosti od odvrtu L sa okamžitá rýchlosť vrtania znižuje, čo je najčastejší prípad vo vrtnej praxi. Pri zvyšovaní okamžitej rýchlosti vrtania s odvrtom dochádza najčastejšie pri poruchách, prípadne pri zmene vrtateľnosti horniny. V takýchto prípadoch výraz (16) je imaginárne číslo a nemožno ho použiť na riadenie procesu. V prípade poruchy automatizované riadenie prechádza na tzv. havarijný režim. Prípad zmeny vrtateľnosti horniny sme už prediskutovali.

Záver

Jednou z obmedzujúcich podmienok pri odvodení vzťahov (8) a (15) bolo, že sa pri vrtaní nemení hornina v tom zmysle, že tak jej vrtateľnosť ako aj abrazivita zostávajú konštantné.

Uvažujme so spojitou zmenou buď vrtateľnosti alebo abrazivity. Toto vyvolá, ako sme už uviedli, potrebu variovať parametre vrtania a snažiť sa dosiahnuť $(P/E)_{\max}$.

Ešte výraznejšie môžu ovplyvniť systém výpočtu $(P/E)_{\max}$ skokové zmeny prevrtávaných hornín. V tomto prípade je potrebné použiť niektorý z klasických systémov optimalizácie, čo môže podstatne zasiahnuť do riadenia, napr. i vrátane potreby výmeny nástroja.

Z uvedeného vyplýva, že nami navrhovaný algoritmus optimalizácie riadenia procesu vrtania, vychádzajúci z požiadavky minimálnych nákladov na bežný meter vrtu, plne nenahradí známe klasické metódy riadenia, ale na jeho základe je možné vybudovať doplnujúci automatizovaný riadiaci systém, ktorý umožní významne inovovať riadenie týchto technológií.

Literatúra

- BEJDA, J., KRÚPA, V. & SEKULA, F. 1993. Algorithm of control of disintegration of rocks at drilling from the point of view of costs per meter at bored hole. In: *Geomechanics 93, Balkema*, Rotterdam 1993, p.407-411.
- JOHNSTON, E.H. 1995. Improved drilling performance and cost reduction through straight-hole-motor drilling in the fort worth basin, *Technol. Today Serves*, Technical University Texas, November 1995, p. 966-969.
- KRÚPA, V. & LAZAROVÁ, E. 1999. Model interakcie vrtacej hlavy plnoprofilového raziaceho stroja (TBM) s horninovým masívom. In: *Zb. prednášok zo 4. geotechnickej konferencie s medzinárodnou účasťou – Prognóza a verifikácia v geotechnickom inžinierstve*, SF STU Bratislava, Katedra geotechniky, Bratislava 1999, s. 97-102.
- MIKLÚŠOVÁ, V. & BEJDA, J. 1997. Some problems of the drilling and boring into great deep. In: *Zb. 8-th international scientific and technical conference „New Methods and technologies in Petroleum Geology, Drilling and Reservoir Engineering“*, ISBN 83-905880-2-1, 19-20 June 1997, Cracow, Poland, AGH, p. 229-235.
- REED, R.L. 1972. Monte Carlo approach to optimal drilling. *Society of Petr. Eng.J.*, October, 1972, p. 33-41.
- SITNIKOV, N.B. 1992. Vlijanije ograničenij na effektivnosť processa burenija glubokich skvažin. *Gornyj žurnal IVUZ*, 7-1992, s. 52-56.
- WALLER, M.D. & ROWSELL, P.J. 1994. Intelligent drilling control. In: *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. A: Min. Industry)*, Vol.103, January-April 1994, p. A 47-A 51.
- WIJK, G. 1991. Rotary drilling prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.28, January 1991, p. 35-42.