

Развој модела за рангирање редуктора и његова верификација кроз практичну примену на рударској механизацији

ФИЛИП М. МИЛЕТИЋ, Универзитет у Београду,

Рударско-геолошки факултет, Београд

МИЛОШ Љ. ТАНАСИЈЕВИЋ, Универзитет у Београду,

Рударско-геолошки факултет, Београд

ДРАГАН М. ИГЊАТОВИЋ, Универзитет у Београду,

Рударско-геолошки факултет, Београд

НИКОЛА Д. ПОЛОВИНА, Електропривреда Србије, Београд

Стручни рад

UDC: 622.23:621.8

DOI: 10.5937/tehnika2006711M

Редуктори који се користе на рударској механизацији раде у условима изузетних промена радних оптерећења. Узимајући у обзир улагања при куповини редуктора и трошкове одржавања услед отказа његових елемената, веома је важно да поменути имају задовољавајући радни век. Анализи ће бити подвргута три типа редуктора. На основу њихових техничких карактеристика биће креиран модел применом PROMETHEE методе са циљем међусобног рангирања понуђених алтернатива. Верификација модела биће извршена на основу података о оствареним радним сатима у практичној примени анализираних редуктора.

Кључне речи: редуктор, методе вишекритеријумског одлучивања, поузданост, сервис фактор, лежајеви

1. УВОД

Механички преносници у основи представљају механизме намењене за пренос механичке енергије од погонске до радне машине, при чему се њима обично врши и промена броја обртаја, обртног момента, а, у појединим случајевима и смера обртања.[1]



Слика 1 - Положај механичког преносника

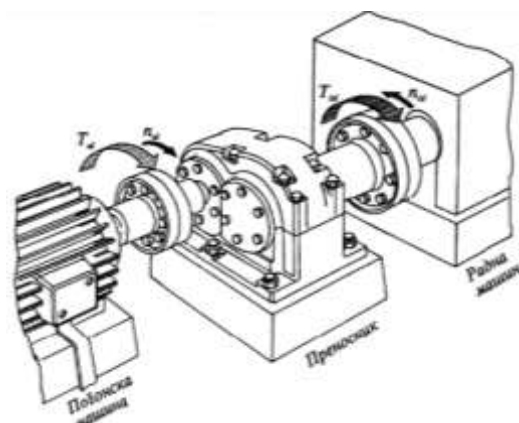
Механички преносници имају изузетно велику примену у машинству јер погонске машине, обично електромотори, раде са знатно већим бројем обртаја од радне машине, па је механичким преносницима потребно извршити прилагођавање броја обртаја погонске машине захтевима радне машине.

Адреса аутора: Филип Милетић, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, Бушина 7

e-mail: filip.miletic@rgf.rs

Рад примљен: 07.12.2020.

Рад прихваћен: 12.12.2020.



Слика 2 - Систем ПМ-Преносник-РМ

2. ПРИМЕНА РЕДУКТОРА У РУДАРСТВУ

Када се говори о редукторима, као механичким преносницима који су изузетно примењени у рударству (погони транспортера са гуменом траком, роторних багера, одлагача, багера ведричара, итд.) они у основи представљају склоп неколико зупчаника (ланчаника, каишника) монтираних на два или више вратила, која се преко лежајева ослањају на кућиште. Намењени су:

- да обезбеде квалитетан пренос и трансформацију обртног момента погонског мотора;

- да смање/редукују број обртаја вратила погонског мотора на број обртаја потребан за погон радног органа и
- да обезбеде сигуран рад гоњене машине.

Редуктори се раде за преносне односе 1–10000, снаге до 100 MW, обимне брзине до 30 m/s (изузетно до 150 m/s), са коефицијентом корисног дејства до 0,97–0,99 (порастом преносног односа овај коефицијент може драстично да опадне).

Избор кинематичке схеме редуктора тесно је повезан са врстом погонског мотора, начином довода погонске снаге, као и са функцијом коју гоњена машина обавља. Додатни услови за избор су везани за ограничења по димензијама и тежини, захтевима монтаже и погодностима за одржавање и ремонт. Битно је истаћи да избор додатно отежавају и услови радне средине, који су посебно изражени у рударству, а то су прашина, влага, корозионо дејство, итд.

Основна подела редуктора приказана је у табели 1. [2]

Табела 1. Класификација редуктора

| Према броју степена преноса | Према положају вратила | Према врсти конструкције кућишта |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Једноступени Вишеступени | Редуктори са паралелним вратилима | Ливена кућишта Заварена кућишта |
| | Редуктори са вратилима која се секу | |
| | Редуктори са мимоилазним вратилима | |
| | Планетни редуктори | |

3. АНАЛИЗА МЕЂУСОБНОГ ОДНОСА СЕРВИС ФАКТОРА И КАРАКТЕРИСТИКА РЕДУКТОРА СА АСПЕКТА РАДНОГ ВЕКА

Да би се извршила анализа односа сервис фактора и карактеристика редуктора са аспекта радног века, неопходно је дефинисати појмове везане за снагу редуктора. Номинална (каталожка) снага редуктора P_N представља снагу коју произвођачи наводе у каталозима.

Односи се на:

- 8/24 – осам сати рада у току дана;
- 10/h – број стартовања на један сат;
- температуру околине 20°C;
- без пикова–удара у раду.

Према истраживању фирме Данфос, од 43 произвођача редуктора, њих 39 наводи номиналну

снагу на бази 8/24 h, свега 4 на бази 16/24 h, што је строжији критеријум.

Излазна снага редуктора (P_{N2}) представља номиналну снагу (P_N) умањену за степен корисног дејства.

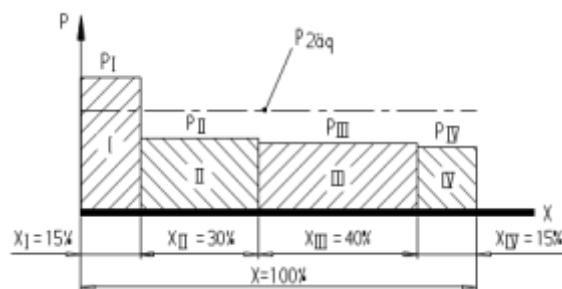
$$P_{N2} = P_N \cdot \eta$$

где је:

- η – 0,98 за једноступене;
- η – 0,97 за двоступене;
- η – 0,96 за троступене редукторе.

Конзумна снага (P_2) представља снагу коју троши радни уређај (транспортер са гуменом траком, дробилица, млин, пумпа, итд.).

Конзумна снага у зависности од покретаног уређаја може бити константна (дозатори, млинови) или променљива (транспортери са гуменом траком, багери, дизалице, итд.). Кад је конзумна снага константна ($P_2 = \text{const.}$), она се узима као меродавна за рачунање еквивалентне снаге. Са друге стране, за случај променљивог оптерећења еквивалентна снага се рачуна на основу слике оптерећења.



Слика 3 – Одређивање еквивалентне снаге

Сервис фактор S_F није стандард, нити норматив, већ представља препоруку. Највише у употреби су препоруке AGMA и VDI. AGMA – American Gear Manufacturers Association. VDI – The Association of German Engine. Сервис фактор представља однос номиналне и конзумне снаге.

$$S_F = \frac{P_N}{P_2}$$

Сервис фактор је интегрални степен сигурности и има следеће вредности:

- 1,15 – за електромоторе;
- 2,5 – за механичке спојнице;
- 3 – за редукторе

Елементи редуктора димензионисани су на основу трајне динамичке чврстоће. Лежајеви имају временско ограничење (за номиналну снагу, радни век износи 10 000 сати). Теоријски радни век легаја за номиналну снагу P_N рачуна се на основу обрасца:

$$L_{h10} = \left(\frac{P_{N2}}{P_2}\right)^{3,3} \cdot 10000 \cdot \frac{n_{2n}}{n_2}$$

Формула се односи на $S_F=1$, односно, када је $P_{N2}=P_2$. Применљива је код класичних редуктора, и за конзумну снагу $P_2 = 220 \text{ kW}$ и $n_2 = 69 \text{ }^\circ/\text{min}$.

4. РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ОЦЕНУ РЕДУКТОРА ПРИМЕНОМ PROMETHEE МЕТОДЕ

PROMETHEE метода је заснована на уопштавању појма критеријума са шест типова генерализованих критеријумских функција. На основу тих функција дефинише се математичка релација за рангирање. Корисник има слободу да уведе нове типове генерализованих критеријума и искаже своје преференце увођењем тежинских коефицијената.

Математички принцип PROMETHEE методе заснива се на увођењу функције преференце $P(a, b)$ за алтернативе a и b које су вредноване критеријумским функцијама (означимо једну од њих са f). Ако је алтернатива a боља од алтернативе b , према критеријуму f : $f(a) > f(b)$. Функција преференце се дефинише на следећи начин:

$$P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } f(a) \leq f(b) \\ P(f(a) - f(b)), & \text{ако је } f(a) > f(b) \end{cases}$$

Према методама из фамилије PROMETHEE, постоји шест типова функција преференције. Вредности параметара q , r и σ треба одредити или задати за сваку критеријумску функцију према усвојеном типу преференције.

Табела 2. Функције преференције

| | Критеријум | Функција |
|-----|--------------------------------------|--|
| I | Обичан (Usual shape) | $P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq 0 \\ 1, & \text{ако је } d > 0 \end{cases}$ |
| II | Квази (U-shape) | $P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ако је } d \leq q \\ 1, & \text{ако је } d > q \end{cases}$ |
| III | Линеарни (V-shape) | $P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ако је } d \leq q \\ d/p & , & \text{ако је } q < d \leq p \\ 1 & , & \text{ако је } d > p \end{cases}$ |
| IV | Нивоски (Level-shape) | $P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ако је } d \leq q \\ 1/2 & , & \text{ако је } q < d \leq p \\ 1 & , & \text{ако је } d > p \end{cases}$ |
| V | Линеарни са подручјимаинди ференције | $P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ако је } d \leq q \\ (d-q)/(p-q) & , & \text{ако је } q < d < p \\ 1 & , & \text{ако је } d > p \end{cases}$ |
| VI | Gausov (Gaussian preference) | $P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ако је } d \leq 0 \\ 1 - e^{-(d^2/2\sigma^2)} & , & \text{ако је } d > q \end{cases}$ |

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

Функција преференције $P(a, b)$ се односи на упоређивање алтернатива a и b .

У датим функцијама параметар p представља најмање одступање две оцењиване алтернативе које треба сматрати значајним.

Параметар q представља највеће могуће одступање између две оцењиване алтернативе које треба сматрати незнатним. Параметар σ је Гаусов праг значајности и представља одступање између две оцењиване алтернативе које се сматра срећеним степеном преференце. Мултикритеријумски коефицијент преференције алтернативе a над b дефинисан је изразом:

$$\Pi(a,b) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(a,b)$$

где је: n – број критеријума, w_i – тежина i -тог критеријума.

Сума свих тежина w једнака је јединици, што је постављено као услов. Да би се то постигло неопходна је нормализација оригиналних тежина. За мултикритеријумску анализу уводе се токови преференције:

$$\varphi^+(a_j) = \sum_{m=1}^j \Pi(a_j, a_m)$$

$$\varphi^-(a_j) = \sum_{m=1}^j \Pi(a_m, a_j)$$

Како би се остварило мултикритеријумско рангирање уводи се нето ток:

$$\varphi_j(a_j) = \varphi^+(a_j) - \varphi^-(a_j); \quad j = 1, \dots, J$$

где је: J – број алтернатива.

Алтернатива a_j је мултикритеријумски боља од a_k ако је $\varphi_j > \varphi_k$.

Табела 3. Улазни подаци за анализу

| Ознака редуктора | $P_{N, kW}$ | Степен корисност | P_{N2} | P_2 | P_{N2}/P_2 | S_F |
|------------------|-------------|------------------|----------|-------|--------------|-------|
| V3SH9 | 239 | 0.96 | 229.4 | 220 | 1.04 | 1.09 |
| V3SH10 | 288 | 0.96 | 276.5 | 220 | 1.26 | 1.31 |
| V3SH11 | 421 | 0.96 | 404.2 | 220 | 1.84 | 1.91 |

Улазни подаци за креирање модела односе се на техничке карактеристике редуктора; пре свега каталожку снагу коју прописује произвођач P_N ,

излазну снагу P_{N2} која у основи представља каталошку снагу умањену за губитке услед трења зупчастих парова и конзумну снагу P_2 тачније снаге коју троши радни уређај.

Верификација модела биће извршена на основу остварених учинака редуктора у практичној примени на рударској опреми.

На основу креираног модела применом PROMETHEE методе дошло се до следећег рангирања понуђених алтернатива.

Табела 4. Резултати PROMETHEE методе

| РЕЗУЛТАТИ PROMETHEE МЕТОДЕ | | |
|----------------------------|-------------------------|------|
| Тип редуктора | Израчунати коефицијенти | ранг |
| B3SH9 | 0.6664 | 3 |
| B3SH10 | 0.4165 | 2 |
| B3SH11 | 0.0000 | 1 |



Слика 4 - Графички приказ резултата

5. ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА НА ОСНОВУ ОСТВАРЕНИХ САТИ РАДА У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ РЕДУКТОРА

Верификација креираног модела биће извршена на основу радног века лежајева остварених током експлоатације редуктора. Веома важан податак представљају специфични трошкови који се одређују као однос набавне цене и остварених радних сати елемента.

Табела 5. Специфични трошкови

| Ознака редуктора | Цена редуктора, € | Радни век лежајева, h | Специфични трошкови, €/h |
|------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| B3SH9 | 20700 | 11487 | 1.8 |
| B3SH10 | 24800 | 21256 | 1.17 |
| B3SH11 | 32800 | 74409 | 0.44 |

У овом случају оптималан редуктор је B3SH11 са аспекта трајности лежајева и специфичних

трошкова. На тај начин је извршена верификација модела креираног на основу техничких карактеристика редуктора, који је као најбољу алтернативу такође рангирао редуктор B3SH11.



Слика 5 - Верификација модела на основу експлоатационих учинака

Отказ лежаја (лом спољне кошуљице) изазвао је несаосност вратила што је резултирало ломом зубаца зупчаника. Основни узрок поменуте хаварије изазвао је лош мониторинг, односно, лоше праћење стања и понашања елемената редуктора. Правилним мониторингом могуће је благовремено уочити иницијална оштећења и на тај начин спречити веће отказе.

Увођењем ових мера потенцијални трошкови услед стајања машине због отказа и отклањања квара свели би се на минимум. Мониторинг систем би благовремено наговештавао о потенцијалним проблемима елемената (повећана температура лежаја, вибрације, итд.).



Слика 6 - Хаварија елемената редуктора

Генерално, мониторинг треба да обухвати промене:

- температуре;
- буке и
- вибрација.

Повећање ових параметара указује на почетак оштећења и на предузимање одређених мера. Савремени индустријски зупчаници и редуктори раде обично у условима хидродинамичког и мешовитог подмазивања. Међутим, на рударској опреми редуктори и елементи унутар њега изложени су ударним оптерећењима, што за последицу има пораст радних температура и до 100°C.

За такве радне услове, неопходно је изабрати адекватно уље, следећих карактеристика:

- високе оксидационе и термичке стабилности са ЕР адитивима;
- високе тачке кључања и ниске тачке течења;
- високог индекса вискозности и
- одређене вискозне градијације према конструкционим карактеристикама склопа.

Задатак редукторских уља није само да врши функцију подмазивања лежајева и зупчаника у циљу смањења трења и хабања већ и заштита од корозије, хлађење, заптивање и заштита од високих притисака.

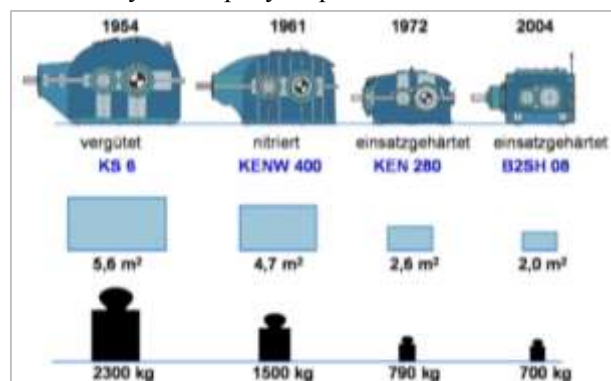
Редукторска уља садрже ЕР (Extreme Pressure) адитиве који онемогућавају директан контакт метала о метал приликом спрезања зупчаника. Приликом рада долази до повећања температуре у зони спрезања зупчаника тако да се на повишеним температурама (изазване појачаним трењем) активирају ЕР адитиви који формирају заштитни површински слој који онемогућава хабање металних површина. Најважније особине редукторских уља су:

- вискозност – уље мора да обезбеди довољну јачину уљног филма између зубаца зупчаника у свим радним условима, а истовремено да добро одводи топлоту са места спрегнутих зупчаника;
- заштита од високих притисака и ударних оптерећења – редукторска уља садрже ЕР адитиве (Extreme Pressure) који спречавају директан контакт метала о метал, који се активирају код повећаног трења, односно повишених температура, формирају заштитни површински слој који спречава хабање металних површина и оштећење зуба зупчаника;
- отпорност према оксидацији – редукторска уља садрже адитиве антиоксиданте који спречавају

процес оксидације уља (старење), односно спречавају појаву лакова, депозита и киселих продуката;

- отпорност према корозији – адитиви против корозије у редукторском уљу спречавају процес корозије металних површина;
- отпорност према стварању пене – адитиви антипенушавци спречавају појаву пене која је узрок некавалитетног подмазивања и локалних прегревања;
- способност издвајања воде – адитиви деемулгатори у редукторском уљу имају улогу одвајања воде из уља, чиме се спречава процес корозије металних делова.

За редукторска уља важне су и две посебне особине: способност за брзо издвајање воде (деемулговање) и брзо издвајање ваздуха. Правилан избор редукторских уља подразумева познавање врсте зупчастих парова и типова озубљења, материјала од којих су израђени, услова рада, радних температура, начина подмазивања, итд. Редукторска уља, у зависности од примене, производе се од минералних базних уља, полиалфаолефина, синтетичких естера и полиалкиленгликола. Развојем редуктора појавио се проблем са одвођењем топлоте са кућишта редуктора.



Слика 7 - Развој редуктора (са аспекта смањења масе и расхладне површине)

Са претходне слике уочава се тренд смањења масе и расхладне површине редуктора што захтева додатно хлађење помоћу:

- вентилатора;
- расхладних цеви;
- додатних хладњака и
- комбиновано хлађење.

На трајност редуктора веома велик утицај има температура уља. Наиме, ако уље има температуру 10°C већу од дозвољене, радни век уља, односно, трајност уља износи свега 50% од предвиђеног периода.

6. ЗАКЉУЧАК

Примена редуктора у рударству је изузетна, како на погонима основне механизације (роторни багери, багери ведричари, одлагачи), тако и на погонима транспортера са гуменом траком и на крају, на машинама помоћне механизације. С обзиром на функцију коју редуктори обављају и улагања при њиховој куповини, веома је битно да исту врше са што мање отказа елемената. Најчешће долази до отказа лежајева услед повећане температуре, лошег подмазивања и слично, што индукује велике трошкове због стајања система и отклањања насталих кварова. Често отказ лежајева може довести до веће хаварије других елемената редуктора.

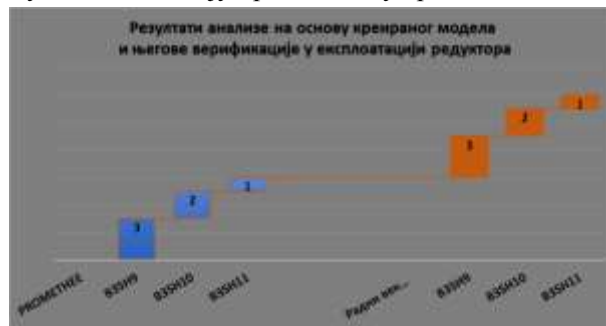
Један од начина смањења трошкова одржавања је примена мониторинг система за праћење стања и понашања елемената редуктора, чиме би се поузданост подигла на виши ниво.

У овом раду анализирана су три типа редуктора на основу техничких карактеристика, са једне стране, развојем модела за њихово рангирање; и оствареном времену рада лежајева и специфичним трошковима, са друге стране, а све са циљем верификације модела конкретним радним учинцима редуктора.

На основу техничких карактеристика предност у односу на понуђене алтернативе добио је редуктор В3SH11. Креирани модел верификован је кроз експлоатационе учинке који су доказали почетну хипотезу о рангирању редуктора преко њихових техничких карактеристика.

Редуктор типа В3SH11 у потпуности је оправдао набавну цену, лежајеви су остварили убед-

љиво највеће сате рада, са изузетно ниским специфичним трошковима. Још једном се показује да се са већим капиталним улагањима у старту, оперативни трошкови у експлоатацији своде на минимум или пак имају прихватљиву вредност.



Слика 8 - Упоредни приказ резултата анализе на основу креираног модела и његове верификације у експлоатацији

7. ЗАХВАЛНИЦА

Овај чланак је допринос пројекту TR33025 који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Предавања Департамента за механизацију и конструкционо машинство Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду;
- [2] *Машине и уређаји за експлоатацију нафте и гаса, предавања*, Рударско-геолошки факултет, Београд;
- [3] Flender Handbuch.

SUMMARY

CREATING OF GEARBOXES RANGE MODELS ON THE BASIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS AND ITS VERIFICATION THROUGH PRACTICAL APPLICATION TOMINING MECHANIZATION

Gearboxes used on mining machinery work under conditions of exceptional changes in working loads. Given the not negligible investment in purchasing the gearboxes and maintenance costs due to the failure of his elements, it is very important that they have a satisfactory service life. Based on their technical characteristics, a model will be created using the PROMETHEE method with the aim of ranking each of the offered alternatives. Model verification will be performed on the basis of hours worked in the practical application of the reducers analyzed.

Key words: Gearbox, multicriteria decision methods, reliability, service factor, bearings