

VIACNÁSOBNÁ LINEÁRNA REGRESNÁ ANALÝZA AKO NÁSTROJ PREDIKCIE ŽIVOTNOSTI MAZACIEHO OLEJA

Marián Kučera

¹Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta techniky, Katedra mechaniky, strojnictva a dizajnu,
Študentská 26, 960 01 Zvolen, kucera@tuzvo.sk

MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS AS A TOOL FOR PREDICTING USEFUL LIFE LUBRICATING OIL

Abstract: *The application of multiple linear regression is an wantable alternative for lubricating oil prediction due to its simplicity and efficacy. The aim of this article is to consider multiple variables to assess the quality of lubricating oil, because a larger number of parameters is expected to provide a more accurate and authentic prediction. Spearman's correlation coefficient r_s was used to identify the lubricating oil parameters that were significantly correlated with its service life in the circulatory system. The properties of the Spearman coefficient indicate that it is used in situations where the random variables under investigation are ordinal in nature and we do not assume a purely linear relationship or type of distribution between them. A detailed analysis resulted in a total of five significant parameters affecting the service life of engine oil, namely total base number, oxidation, wear-causing metal elements (Fe and Pb) and the metal additive Zn. The degree of tightness of dependence according to the coefficient of determination R^2 for multiple linear regression is very high, namely 0.93, which demonstrates its ability to predict the required remaining useful life of the oil charge.*

Key words: *engine oil degradation, predictive maintenance, multiple regression, correlation analysis*

ÚVOD

Tradičné metódy údržby na základe času prevádzky, ktoré zahŕňajú výmenu oleja vo vopred určených intervaloch nezohľadňujú skutočný stav degradácie olejovej náplne [1]. Nadmerná údržba zvyšuje náklady v dôsledku zbytočných výmen oleja, zatiaľ čo nedostatočná údržba zvyšuje riziko porúch komponentov pracovných zariadení. Preto sú potrebné efektívnejšie metódy údržby založené na skutočnom stave oleja [2]. Údržba na základe stavu „Condition – based maintenance“ je metóda zavedená v 70. a 80. rokoch 20. storočia, a zahŕňa monitorovanie stavu degradácie prostredníctvom analýzy vlastností získaných zo vzoriek použitého mazacieho [3]. Ako uvádzajú autori [4-6] analýza vlastností oleja poskytuje cenné informácie o starnutí a poškodení pohyblivých častí, ktoré sú v kontakte s olejom, a ponúka účinný prostriedok včasného varovania pred postupom poruchy. Okrem toho výsledky týchto analýz nielen odhaľujú aktuálny stav oleja, ale umožňujú aj prediktívnu údržbu za pomoci matematických modelov na predpovedanie degradácie maziva na

základe najnovších údajov zo vzoriek, čo prezentujú aj výskumy [7-9]. Z tohto dôvodu práve monitorovanie stavu maziva pri podpore rozhodovania o údržbe potvrdzuje dôležitosť stanovenia presného a spoľahlivého rámca zostávajúcej životnosti (RUL).

MATERIÁL A METÓDY

Motorové oleje majú zásadný vplyv na správnu prevádzku motora. Najdôležitejšou funkciou motorových olejov je mazanie, ktoré musí byť zabezpečené nielen pri všetkých prevádzkových teplotách, ale aj pri rôznych úrovniach zaťaženia [10]. Okrem toho sa od motorového oleja vyžaduje chladenie (prenos tepla vznikajúci počas spaľovania alebo trením vzájomne sa pohyblivých častí), tesnosť spaľovacej komory, ochrana proti korózii a konzervácia kovových povrchov, keď motor nebeží. Tiež by mal zabezpečiť správne odstraňovanie nečistôt a zníženie hluku. Experimentálne merania boli realizované s vysoko výkonným syntetickým motorovým olejom Shell Rimula R6M s viskozitnou triedou SAE 10W-40 vo štvorvalcovom motore PowerTech™ s objemom 4,5 litra použitom v kolesovom traktore John Deere 6115M, ktorý pracoval v náročných lesných podmienkach. Použitý motorový olej je vhodný pre nízkoemisné dieselové motory v širokej škále nákladných vozidiel a dopravnej techniky a spĺňa špecifikácie ACEA E7/E4 a API CF. Vzorky motorového oleja boli odoberané každé 2 mesiace. Analýza motorového oleja zahŕňala sledovanie kinematickej viskozity pri 100°C, obsah vody, alkalickú rezervu oleja, sadze, oxidáciu, obsah glykolu, abrazívne kovy, koncentráciu kontaminantov či aditívnych prvkov a boli vykonané v spolupráci so špecializovanými tribodiagnostickými laboratóriami. Limitné hodnoty uvedené v tabuľke 1 sú hodnoty stanovené výrobcami mazacích olejov.

Tab. 1 Limitné hodnoty pre vykonané analýzy sledovaných parametrov

	Sledovaný parameter	Jednotka	Prijateľné limity
	*KV _{40°C}	mm ² .s ⁻¹	± 15 %
	**KV _{100°C}	mm ² .s ⁻¹	± 15 %
Fyzikálne vlastnosti	číslo kyslosti	mg KOH.g ⁻¹	max. 3.5
	obsah vody	ppm	max. 2000
	alkalická rezerva	mg KOH.g ⁻¹	max. 14.0
Abrazívne kovy	obsah cínu	ppm	max. 12
	obsah hliníka	ppm	max. 25
	obsah chrómu	ppm	max. 15
	obsah medi	ppm	max. 40
	obsah železa	ppm	max. 75
	obsah niklu	ppm	max. 40
	obsah olova	ppm	max. 40

Poznámka: * kinematická viskozita pri teplote 40°C, ** kinematická viskozita pri teplote 100°C

Pokračovanie Tab. 1 Limitné hodnoty pre vykonané analýzy sledovaných parametrov

	Sledovaný parameter	Jednotka	Prijateľné limity
Prvky kontaminácie	obsah bóru	ppm	max.20
	obsah kremíka	ppm	max. 20
	obsah sodíka	ppm	max. 40
Aditívne prvky	obsah molybdén	ppm	inf.
	obsah horčíka	ppm	inf.
	obsah vápnika	ppm	inf.
	obsah fosforu	ppm	inf.
	obsah zinku	ppm	inf.

Z dôvodu reprodukovateľnosti výsledkov bolo potrebné pri každom odbere vzorky dodržiavať nasledujúce postupy a zásady:

- každý odber vzorky bol vykonaný z rovnakého miesta odberu (priestor pre mierku oleja) a rovnakým spôsobom (prísavka oleja) tak, aby sa vždy získalo rovnaké zloženie oleja a reprezentatívna vzorka pre celú olejovú náplň.
- pred samotným odberom bolo miesto odberu dôkladne vyčistené a časť oleja (cca 0,5 l) bola odobratá do pomocnej nádoby.
- olej bol ihneď po zastavení motora (zahriaty na prevádzkovú teplotu) odoberaný do uzatvárateľnej plastovej vzorkovnice, aby sa vzorka mohla pred samotnou analýzou v laboratóriu správne homogenizovať.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

V tejto časti príspevku sú podrobne rozoberané výsledky získané na základe metodických krokov uvedených v kapitole Materiál a metódy. V tabuľke 2 sú spracované namerané hodnoty 5 vzoriek použitého motorového oleja počas prevádzky lesného traktora.

Tab. 2 Výsledky analýzy vzoriek motorového oleja na základe pravidelného odberu z traktora

Testovacie kritérium	KV _{100°C}	Alkalická rezerva	Obsah vody	Oxidácia	Obsah glykolu
Referenčný olej	14,5 mm ² .s ⁻¹	13,5 mg KOH.g ⁻¹	366 ppm	6,5 Abs.cm ⁻¹	0,09 %
Odber č.1	13,5 mm ² .s ⁻¹	12,4 mg KOH.g ⁻¹	648 ppm	8,8 Abs.cm ⁻¹	0,08 %
Odber č.2	14,0 mm ² .s ⁻¹	12,2 mg KOH.g ⁻¹	486 ppm	9,1 Abs.cm ⁻¹	0,07 %
Odber č.3	14,2 mm ² .s ⁻¹	11,8 mg KOH.g ⁻¹	880 ppm	10,8 Abs.cm ⁻¹	0,08 %
Odber č.4	14,3 mm ² .s ⁻¹	12,4 mg KOH.g ⁻¹	932 ppm	9,1 Abs.cm ⁻¹	0,05 %
Odber č.5	14,2 mm ² .s ⁻¹	10,8 mg KOH.g ⁻¹	697 ppm	11,0 Abs.cm ⁻¹	0,04 %

Pokračovanie tab.2

Prvky kontaminácie					
	Odber č.1	Odber č.2	Odber č.3	Odber č.4	Odber č.5
Obsah sodíka	0 ppm	0 ppm	1 ppm	9 ppm	0 ppm
Obsah draslíka	0 ppm	0 ppm	0 ppm	8 ppm	0 ppm
Obsah kremíka	0 ppm	0 ppm	1 ppm	9 ppm	0 ppm
Obsah bóru	0 ppm	0 ppm	0 ppm	8 ppm	0 ppm
Obsah vanádu	1 ppm	0 ppm	4 ppm	7 ppm	0 ppm
Abrazívne kovy					
	Odber č.1	Odber č.2	Odber č.3	Odber č.4	Odber č.5
Obsah železa	1 ppm	2 ppm	2 ppm	3 ppm	32 ppm
Obsah medi	2 ppm	1 ppm	1 ppm	2 ppm	43 ppm
Obsah hliníka	1 ppm	1 ppm	1 ppm	0 ppm	4 ppm
Obsah cínu	0 ppm	0 ppm	0 ppm	8 ppm	0 ppm
Obsah olova	0 ppm	1 ppm	1 ppm	0 ppm	5 ppm
Obsah antimónu	3 ppm	11 ppm	3 ppm	6 ppm	5 ppm
Obsah chrómu	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	1 ppm
Obsah niklu	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm
Obsah molybdén	0 ppm	2 ppm	1 ppm	3 ppm	0 ppm
Aditívne prvky					
	Odber č.1	Odber č.2	Odber č.3	Odber č.4	Odber č.5
Obsah zinku	240 ppm	238 ppm	252 ppm	248 ppm	283 ppm
Obsah mangánu	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm	2 ppm
Obsah vápnika	1 ppm	1 ppm	1 ppm	0 ppm	4 ppm
Obsah bária	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm
Obsah fosforu	208 ppm	236 ppm	214 ppm	258 ppm	216 ppm

V ďalšej fáze bol použitý model viacnásobnej lineárnej regresie. Model musel zahŕňať nezávislé vysvetľujúce premenné, ktoré prispievajú k najlepšiemu vysvetleniu odozvy. Regresná analýza nám umožnila nájsť priamku a zodpovedajúcu rovnicu, ktoré najlepšie zodpovedajú nášmu súboru údajov. Doba prevádzky oleja bola určená ako závislá premenná Y a parametre testu analýzy mazacieho oleja, ktoré silne korelujú s dobou prevádzky oleja, boli priradené ako nezávislé premenné. Všeobecný model viacnásobnej lineárnej regresie, ktorý modeluje závislosť vysvetľovanej premennej ako výsledok jej lineárnej závislosti od k nezávislých premenných je popísaný rovnicou (1) :

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + \dots + b_k * X_k + e \quad (1)$$

kde Y je závislá premenná, b_0 je konštanta a b_1, \dots, b_k sú koeficienty prislúchajúce jednotlivým nezávislým premenným X_1, \dots, X_k . Metódou najmenších štvorcov sme vypočítali regresné koeficienty tak, aby súčet štvorcov chýb bol minimálny. Následne sme vykonali korelačnú analýzu medzi všetkými premennými (vysvetľujúcou a odozvou) pomocou Spearmanovho korelačného koeficientu r_s , ktorý je založený na poradových číslach náhodných veličín, čo umožňuje jeho rezistentnosť voči odľahlým hodnotám, na rozdiel od Pearsonovho koeficienta, ktorý je na odľahlé hodnoty citlivý. Typ

korelácie možno rozdeliť do troch typov, ktorých hodnoty sa pohybujú od -1 do 1. Pozitívna korelácia znamená, že premenné sa menia rovnakým smerom, negatívna korelácia znamená, že premenné sa menia opačným smerom a žiadna korelácia znamená, že medzi premennými neexistuje lineárny vzťah. Korelačný koeficient nula znamená, že medzi premennými neexistuje žiadny vzťah, hodnoty medzi 0 a 0,3 naznačujú slabý vzťah, hodnoty od 0,3 do 0,7 naznačujú stredný vzťah a korelačný koeficient od 0,7 do 1 znamená silný vzťah. Hlavnou úlohou korelačnej analýzy bolo zistiť kvalitu regresnej funkcie a silu závislosti. Tento vzťah je tým silnejší a regresná funkcia tým lepšia, čím viac sú empirické hodnoty závislej premennej sústredené okolo odhadnutej regresnej funkcie. Pod hlavnou diagonálou sú uvedené hodnoty korelácie vzorky medzi každou dvojicou premenných a zodpovedajúce p-hodnoty spojené s testom významnosti korelačného koeficientu, tabuľky 3 až 6.

Tab. 3 Korelácia medzi dobou prevádzky oleja a fyzikálnymi parametrami analyzovaného motorového oleja

Premenné	DPO	KV _{100°C}	OV	AR	OX	OG
DPO	-					
KV _{100°C}	0,51	-				
OV	0,34	0,39	-			
AR	- 0,94	- 0,51	- 0,21	-		
OX	0,92	0,49	0,22	- 0,98	-	
OG	- 0,47	- 0,04	0,14	0,52	- 0,48	-

Tab. 4 Korelácia medzi dobou prevádzky oleja a obsahom abrazívnych kovov v analyzovanom motorovom oleji

Premenné	DPO	Fe	Al	Cu	Cr	Ni	Pb	Sb	Mo
DPO	-								
Fe	0,76	-							
Al	0,36	0,67	-						
Cu	0,61	0,73	0,82	-					
Cr	-0,26	0,11	0,22	0,05	-				
Ni	-0,45	-0,27	-0,16	-0,54	-0,05	-			
Pb	0,71	0,63	0,71	0,86	-0,23	-0,45	-		
Sb	-0,19	-0,21	0,21	0,11	0,29	-0,05	0,14	-	
Mo	-0,07	-0,51	-0,61	-0,39	-0,11	-0,11	-0,36	0,22	-

Tab. 5 Korelácia medzi dobou prevádzky oleja a obsahom aditívnych prvkov v analyzovanom motorovom oleji

Premenné	DPO	Zn	Mg	Ca	P
DPO	-				
Zn	0,75	-			
Mg	-0,37	-0,34	-		
Ca	0,11	0,26	0,33	-	
P	0,13	0,04	0,09	0,63	-

Tab. 6 Korelácia medzi dobou prevádzky oleja a obsahom kontaminantov v analyzovanom motorovom oleji

Premenné	DPO	K	B	V	Na	Si
DPO	-					
K	0,27	-				
B	-0,51	-0,21	-			
V	0,04	0,33	-0,20	-		
Na	0,42	0,74	-0,39	0,04	-	
Si	0,63	-0,29	-0,39	-0,21	0,02	-

S ohľadom na výsledky uvedené v tabuľkách 3 až 6 možno pozorovať štatisticky vysokú koreláciu (viac ako 0,7) medzi dobou prevádzky oleja a alkalickou rezervou, oxidáciou, obsahom abrazívnych kovov železa a olova a zinku ako aditívneho prvku s korelačnými koeficientami -0,94, 0,92, 0,76, 0,71 a 0,75. Výsledky tiež ukázali, že aj medzi vybranými prediktormi existuje vysoká korelácia. Tieto parametre boli následne zahrnuté do modelu viacnásobnej lineárnej regresnej analýzy ako prediktory pre predikciu doby prevádzky oleja, tabuľka 7. Rovnako aj riešitelia [11] vykonali niekoľko viacnásobných lineárnych regresíí dostupných prediktorov na posúdenie vlastností mazacích olejov, kde dokázali, že neexistuje celkovo lepšia regresná metóda a výber závisí od predikovanej vlastnosti.

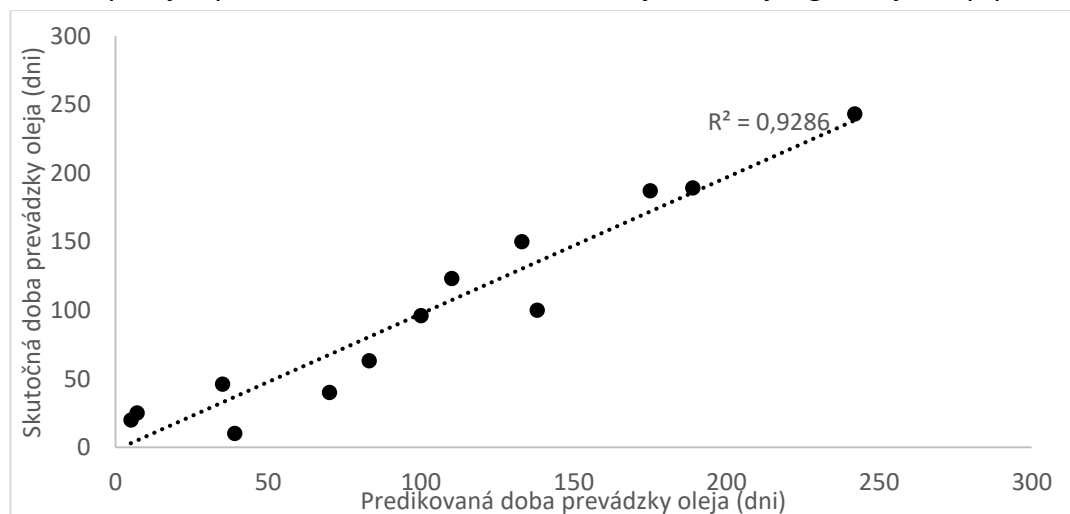
Tab. 7 Viacnásobná regresná analýza medzi dobou prevádzky oleja a 5 premennými parametrami oleja

	Odhad	Štandardná chyba	t hodnota	p hodnota
<i>priesečník</i>	1388,2	681,97	2,035	0,0812
<i>Alkalická rezerva</i>	- 104,77	37,72	-2,777	0,0274
<i>Oxidácia</i>	- 22,052	13,53	-1,631	0,147
<i>Obsah železa</i>	- 0,670	1,16	-0,577	0,582
<i>Obsah olova</i>	2,876	3,28	0,876	0,410
<i>Obsah zinku</i>	0,479	0,65	0,738	0,484

Model viacnásobnej lineárnej regresie vykazoval na hladine významnosti 5 % koeficient determinácie vysoký $R^2 = 0,93$. Rovnica (2) znázorňuje regresnú rovnicu pre túto viacnásobnú regresnú analýzu zostavenú pomocou koeficientov z tabuľky.

$$Y = 1388.2 - 104.77 * X_1 - 22.052 * X_2 - 0.670 * X_3 + 2.876 * X_4 + 0.479 * X_5 \quad (2)$$

Obrázok 1 znázorňuje porovnanie skutočnej doby prevádzky oleja oproti predpokladanej doby prevádzky oleja vytvorenú na základe viacnásobnej lineárnej regresnej analýzy.



Obr. 1 Porovnanie skutočnej doby prevádzky oleja oproti predpokladanej doby prevádzky oleja vytvorenú na základe viacnásobnej lineárnej regresnej analýzy

ZÁVER

Primárnym cieľom tejto práce bolo predikovať dobu prevádzky motorového oleja využitím viacnásobnej lineárnej regresnej analýzy. Hodnotili sa viaceré kritéria sledovaného oleja s cieľom, že väčší počet parametrov poskytne presnejšiu a spoľahlivejšiu predikciu. Prvým krokom analyzovania veľkého množstva údajov, ktoré boli obsiahnuté vo väčšom množstve premenných, bolo vygenerovanie korelačnej matice a preverenie takto objavených, viac či menej očakávaných významných vzťahov. Ako je uvedené z úvodu, hladina významnosti 0,05 znamenala možnosť 5 % chyby pri vyslovení úsudku o existujúcej závislosti. Na určenie miery závislosti bol použitý neparametrický (Spearmanov) korelačný koeficient, ktorý je založený na poradových číslach náhodných veličín, čo umožňuje jeho rezistentnosť voči odľahlým hodnotám. Týmto spôsobom sme identifikovali 5 parametrov motorového oleja, ktoré veľmi silno korelovali (viac ako 0,7) s dobou prevádzky oleja. Tieto parametre boli následne zahrnuté do modelu viacnásobnej lineárnej regresnej analýzy ako prediktory pre predikciu doby prevádzky motorového oleja. Model viacnásobnej lineárnej regresie vykazoval dobrú presnosť predikcie, čo charakterizuje aj vysoký koeficient determinácie ($R^2 = 0,93$) a nízka chyba predikcie. Na prekonanie očakávaných obmedzení tohto výskumu je možné vykonať ďalšie vylepšenia, ako napríklad riešenie problému multikolinearity v rámci parametrov olejovej náplne a tiež zahrnutie väčšieho množstva údajov do analýzy oleja.

LITERATÚRA

- [1] OMIYA, T., HANYUDA, K., NAGATOMI, E. Predicting engine oil degradation across diverse vehicles and identifying key factors. In: Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, s. 1-12. ISSN 0880-3270.
- [2] BAI, R., NOMAN, K., YANG, Y., LI, Y., GUO, W. Towards trustworthy remaining useful life prediction through multi-source information fusion and a novel LSTM-DAU model. In: Reliability Engineering and System Safety, 2024, s. 1-15. ISSN 0951-8320.
- [3] JARDINE, A. K., LIN, D., BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In: Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, s. 1483-1510. ISSN 0880-3270.
- [4] NEVEL, G. E. Oil analysis cost-effective machine condition monitoring technique. In: Industrial Lubrication and Tribology, 1999, s. 119-125. ISSN 0036-8792.
- [5] MACIÁN, V., TORMOS, B., OLMEDA, P., MONTORO, L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. In: Tribology International, 2003, s. 771-776. ISSN 0301-679X.
- [6] KUMAR, M., SHANKAR MUKHERJEE, P., MOHAN MISRA, N. Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: A review. In: Industrial Lubrication and Tribology, 2013, s. 3-11. ISSN 0036-8792.
- [7] VALIŠ, D., ŽÁK, L., POKORA, O. Contribution to system failure occurrence prediction and to system remaining useful life estimation based on oil field data. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2015, s. 36-45. ISSN 1748-0078.

- [8] VALIŠ, D., ŽÁK, L., POKORA, O., LÁNSKÝ, P. Perspective analysis outcomes of selected tribodiagnostic data used as input for condition based maintenance. In: Reliability Engineering and System Safety, 2016, s. 231-242. ISSN 0951-8320.
- [9] WAKIRU, J., PINTELON, L., MUCHIRI, P., CHEMWENO, P. A data mining approach for lubricant-based fault diagnosis. In: Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2021, s. 264-291. ISSN 1355-2511.
- [10] HÖNIG, V., PROCHÁDZKA, P., OBERGRÜBER, M., KUČEROVÁ, V., MEJSTŘÍK, P., MACKŮ, J., BOUČEK, J. Determination of Tractor Engine Oil Change Interval Based on Material Properties. In: Materials, 2020, s.26. ISSN 1996-1944.
- [11] PINHEIRO, C., RENDALL, R., QUINA, M., REIS, M., GANDO-FERREIRA, L. Assessment and prediction of lubricant oil properties using infrared spectroscopy and advanced predictive analytics. In: Energy & Fuels, 2017, s. 179-187. ISSN 0887-0624.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol s podporou grantového projektu VEGA č.1/0121/24 Predikcia reziduálnej životnosti energetických nosičov v prevádzke obehových systémov technických zariadení pre obrábanie a spracovanie dreva s využitím štatistických degradačných modelov.