

Article citation info:

Idzikowski A. Boolean model of HSUH leakage testing for the purpose of designing a diagnosing unit of selected damages of vehicle braking mechanisms. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 78(4): 79-92, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL78.ART6>

Model boole'owski badania szczelności HSUH¹ na potrzeby zaprojektowania diagnozera wybranych uszkodzeń mechanizmów hamulcowych pojazdów

ADAM IDZIKOWSKI²

Politechnika Częstochowska

Streszczenie

Stan techniczny układu hamulcowego pojazdu dopuszczonego do ruchu na drogach publicznych nie może budzić zastrzeżeń. Niezależnie od przeznaczenia i rozwiązania konstrukcyjnego układy hamulcowe można podzielić na mechanizmy hamulcowe i mechanizmy oraz systemy uruchamiające hamulce. Diagnostyka techniczna obejmuje ocenę zdatości technicznej mechanizmów uruchamiających hamulce oraz określanie skuteczności działania układu hamulcowego na stanowisku badawczo-pomiarowym. Dla diagnosty, dokonującego sprawdzenia stanu technicznego pojazdu, jest to zasadnicze badanie kontrolne w zakresie bezpieczeństwa użytkowania pojazdu w ruchu drogowym. Jednym z symptomów niezdatności technicznej samochodowego układu hamulcowego jest brak szczelności obwodu hydraulicznego. W procesie eksploatacji mając na uwadze bezpieczeństwo obiektów technicznych czynnikiem wpływającym na rozwój diagnostyki jest przede wszystkim minimalizacja zagrożeń zdrowia i życia ludzkiego, zagrożeń środowiska biologicznego i technicznego. Kierując się tymi założeniami celem przeprowadzonych badań było opracowanie metody procesu diagnozowania nieszczelności obiegu hydraulicznego na potrzeby zaprojektowania diagnozera mechanizmów hamulcowych. W publikacji przedstawiono Autorski model matematyczny oparty na funkcjach boole'owskich, będący częścią prowadzonych analiz matematycznych.

¹ HSUH – HYDRAULICZNY SAMOCHODOWY UKŁAD HAMULCOWY

² Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, Katedra Systemów Technicznych i Bezpieczeństwa, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa, Poland; e-mail: adam.idzikowski@poczta.fm

Słowa kluczowe: układ hamulcowy, obieg hydrauliczny, eksploatacja, nieszczelność, modelowanie matematyczne, funkcje boole'owskie

1. Wprowadzenie

Rozwój i zmiany konstrukcyjne pojazdów mechanicznych powodują duży postęp w dziedzinie diagnozowania. Zmianom uległy metody badawcze, powstały nowoczesne stanowiska wyposażone w najnowszej generacji urządzenia kontrolno - pomiarowe, dzięki którym możemy badać wiarygodnie obiekty techniczne m.in.: układy hamulcowe różnych typów. Prawidłowe i bezpieczne hamowanie jest sumą kilku podstawowych elementów [22]:

- 1) właściwie zaprojektowana konstrukcja układów hamulcowych dla danego typu pojazdu,
- 2) prawidłowy dobór materiałów ciernych do danego typu układu hamulcowego i pojazdu,
- 3) odpowiednia jakość i wykonanie poszczególnych elementów składowych mechanizmu hamulcowego,
- 4) prawidłowy montaż tych elementów,
- 5) właściwa obsługa układów hamulcowych w trakcie eksploatacji.

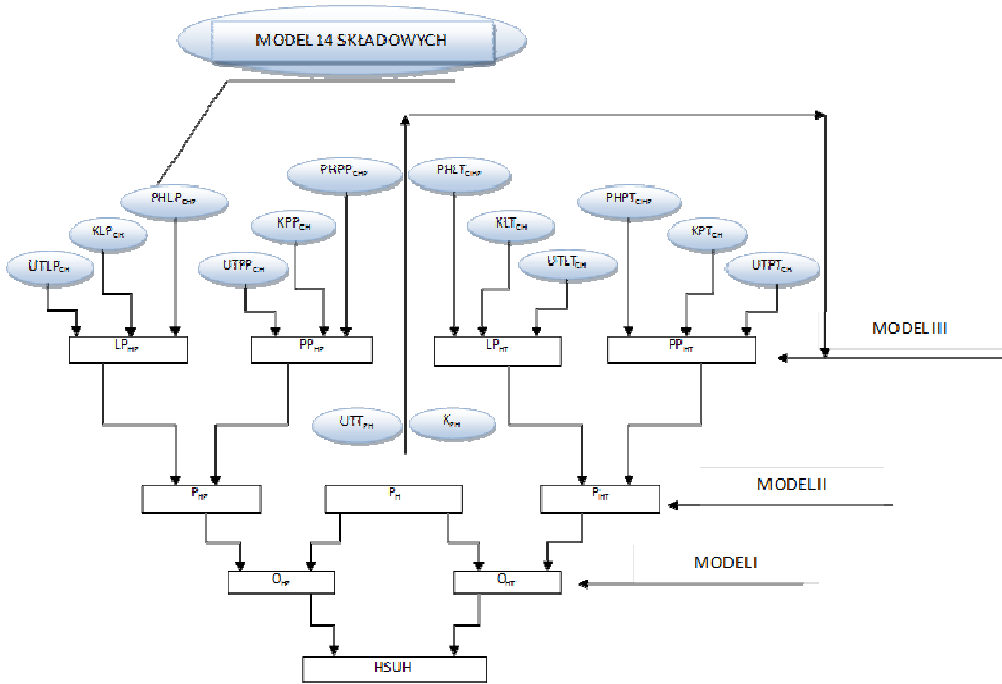
Badania diagnostyczne w Stacjach Kontroli Pojazdów pozwalają na ocenę stanu technicznego układu hamulcowego również pod kątem oceny jakości elementów konstrukcji. Celem badań diagnostycznych [1, 9, 19, 23, 24, 25] jest określenie stanu obiektu technicznego lub procesu w chwili uznanej za ważną. Określenie to jest niezbędne, aby przez porównanie stanu rzeczywistego – chwilowego, ze stanem wzorcowym, wydać orzeczenie o zdatności lub niezdatności obiektu technicznego, wpływając na wzrost bezpieczeństwa oraz odpowiednią efektywność użytkowania [3]. Wstępna ocena układu hamulcowego ma na celu określenie stopnia zużycia elementów układu oraz przyczyn stwierdzonych objawów jego niesprawności (braku zdatności technicznej), co przekłada się na jakość użyteczną konstrukcji [6, 7, 8, 11, 12, 20]. Trwałość urządzeń w określonych warunkach otoczenia procesu eksploatacji zależy głównie od intensywności ich użytkowania. Intensywność użytkowania jest więc podstawowym narzędziem, za pomocą którego może on wpływać na proces uszkodzeń i zużycie potencjału eksploatacyjnego obiektów technicznych. Projektowanie diagnostera mechanizmów hamulcowych dla pojazdów mechanicznych z wykorzystaniem technik modelowania jest zatem kwestią o ogromnym znaczeniu. W szczególności gdy dotyczy to problematyki diagnostycznej wykorzystywanej w automatyzowaniu procesów eksploatacji [4].

2. Model boole'owski analizy struktury procesu diagnozowania nieszczelności/szczelności hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego, dla $i \in 1..3$, oraz modelu docelowego HSUH w Algebrze Boole'a funkcji boole'owskich. Interpretacje techniczne

Badania podjęto zgodnie z zaleceniami metody morfologicznej. Fazy i etapy metody morfologicznej zawarto w tab. 1. Natomiast na rysunku 1 przedstawiono model graficzny „cech – obiektów składowych” struktury, opisując techniczną budowę HSUH w kolejnych swego rodzaju przekrojach będących wektorami o dwóch, trzech, pięciu i docelowo w tej pracy 14 składowych [4, 5, 9, 13, 15, 15, 16, 17, 18].

Fazy	Etapy
Określenie problemu	Wytyczenie problemu Definiowanie problemu
Analiza problemu	Identyfikacja parametrów Poszukiwanie możliwych stanów parametrów
Synteza	Budowa tablicy morfologicznej Redukcja przestrzeni morfologicznej

Tabela 1. Fazy i etapy metody morfologicznej



Rys. 1. Model graficzny „cech – obiektów składowych” struktury HSUH

O_{HP} = obiekt hydrauliczny hamulców przednich, O_{HT} = obiekt hydrauliczny hamulców tylnych, P_H = pompa hamulcowa, P_{HP} = pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców przednich, P_{HT} = pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców tylnych, PP_{HP} = prawy pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców przednich, LP_{HP} = lewy pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców przednich, PP_{HT} = prawy pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców tylnych, LP_{HT} = lewy pozapompowy podobieg hydrauliczny hamulców tylnych, UTT_{PH} = uszczelki tylnego tłoka pompy hamulcowej, K_{PH} = korpus pompy hamulcowej,

$UTPP_{CH}$ = uszczelki tłoka prawego przedniego cylindra hamulcowego, KPP_{CH} = korpus prawego przedniego cylindra hamulcowego, $PHPP_{CHP}$ = przewód hamulcowy łączący prawy przedni cylinder hamulcowy z pompą hamulcową, $UTLP_{CH}$ = uszczelki tłoka lewego przedniego cylindra hamulcowego, KLP_{CH} = korpus lewego przedniego cylindra hamulcowego, $PHLP_{CHP}$ = przewód hamulcowy łączący lewy przedni cylinder hamulcowy z pompą hamulcową, $UTPT_{CH}$ = uszczelki tłoka prawego tylnego cylindra hamulcowego, KPT_{CH} = korpus prawego tylnego cylindra hamulcowego, $PHPT_{CHP}$ = przewód hamulcowy łączący prawy tylny cylinder z pompą hamulcową, $UTLT_{CH}$ = uszczelki tłoka lewego tylnego cylindra hamulcowego, KLT_{CH} = korpus lewego tylnego cylindra hamulcowego, $PHLT_{CHP}$ = przewód hamulcowy łączący lewy tylny cylinder hamulcowy z pompą hamulcową

Badając zgodnie z zaleceniami analizy morfologicznej należy przystąpić do fazy syntezy parametrów (od zmiennych boole'owskich do funkcji boole'owskich), możliwych ich stanów (od algebry Boole'a argumentów funkcji do algebry Boole'a funkcji boole'owskich oraz syntezy relacji, które w tej fazie opisuje się działaniami na funkcjach boole'owskich sformułowanych w kolejnych modelach $HSUH_i$, $i \in 1..3$ i $HSUH$).

Algebra Boole'a funkcji boole'owskich k-zmiennych dla tych modeli, gdzie:

$$(i, k) \in \{(1,2); (2,3); (3,5); (4,14)\}$$

mają postać:

$$B_{(i,k)} = (FB_{(i,k)}, +, \cdot, \overline{(\cdot)}, 0, 1)$$

$FB_{(i,k)}$ = zbiór funkcji boole'owskich k-zmiennych dla modeli $HSUH_i$,

$+, \cdot, \overline{(\cdot)}$ – działania na funkcjach boole'owskich ze zbiorów $FB_{(i,k)}$,

$f_{(i,k)} = 0$, $f_{(i,k)} = 1$ – funkcje zero i funkcje jeden w zbiorze $FB_{(i,k)}$

2.1. Model $HSUH_1$ w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich

Niech:

$$r = (r_1, r_2) \in B^2 \wedge f_1 : B^2 \rightarrow B$$

$f_1(\mathbf{r}) = r_1 \cdot r_2$ - funkcja nieszczelności $HSUH_1$ oraz

$f_{1OP}(\mathbf{r}) = r_1$ - funkcja boole'owska $f_{1OP} : B^2 \rightarrow B$ nieszczelności O_{HP} ,

$\overline{f_{1OP}}(\mathbf{r}) = \overline{r_1} = f_{1SOP}(\mathbf{r})$ – funkcja boole'owska szczelności O_{HP} ,

$f_{1OT}(\mathbf{r}) = r_2$ - funkcja boole'owska $f_{1OT} : B^2 \rightarrow B$ nieszczelności O_{HT} ,

$\overline{f_{1OT}}(\mathbf{r}) = \overline{r_2} = f_{1SOT}(\mathbf{r})$ – funkcja boole'owska O_{HT} .

Funkcja boole'owska $f_1 : B^2 \rightarrow B$ nieszczelności modelu $HSUH_1$ jest iloczynem boole'owskim funkcji f_{1OP} i f_{1OT} postaci:

$$f_1(\mathbf{r}) = f_{1OP}(\mathbf{r}) \cdot f_{1OT}(\mathbf{r})$$

$$\overline{f_1(\mathbf{r})} = \overline{f_{1OP}(\mathbf{r})} + \overline{f_{1OT}(\mathbf{r})} = f_{1SOP}(\mathbf{r}) + f_{1SOT}(\mathbf{r}) = f_{1S}(\mathbf{r})$$

oraz funkcja boole'owska $f_{1S} : B^2 \rightarrow B$ szczelności modelu HSUH₁ jest sumą boole'owską funkcji f_{1SOP} i f_{1SOT} postaci:

$$\overline{f_1(\mathbf{r})} = \overline{f_{1OP}(\mathbf{r}) \cdot f_{1OT}(\mathbf{r})} = \overline{f_{1OP}(\mathbf{r})} + \overline{f_{1OT}(\mathbf{r})} = f_{1SOP}(\mathbf{r}) + f_{1SOT}(\mathbf{r}) = f_{1S}(\mathbf{r})$$

Model ten w języku algebry Boole'a funkcji boole'owskich formułuje informację strukturalną diagnozy globalnej o nieszczelności/szczelności O_{HP} i O_{HT} .

Czyli:

$f_1(\mathbf{r}) = f_{1OP}(\mathbf{r}) \cdot f_{1OT}(\mathbf{r})$ – nieszczelność w modelu HSUH₁ jest iloczynem boole'owskim nieszczelności pozapompowych podobiegów hydraulicznych hamulców przednich i hamulców tylnych, oraz

$f_{1S}(\mathbf{r}) = f_{1SOP}(\mathbf{r}) + f_{1SOT}(\mathbf{r})$ – szczelność w modelu HSUH₁ jest sumą boole'owską szczelności pozapompowych podobiegów hydraulicznych hamulców przednich i hamulców tylnych.

2.2 Model HSUH₂ w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich

Niech:

$\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3) \in B^3$ i $f_2 : B^3 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności modelu HSUH₂.

Ponieważ:

$$f_2(\mathbf{s}) = (s_1 + s_2)(s_1 + s_3)$$

to definiując funkcje boole'owskie:

$f_{2PP}(\mathbf{s}) = s_1 + s_2$; $f_{2PP} : B^2 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_H lub P_{HP}

$f_{2PT}(\mathbf{s}) = s_1 + s_3$; $f_{2PT} : B^2 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_H lub P_{HT}

wynika stąd, że funkcja boole'owska f_2 jest iloczynem funkcji boole'owskich postaci:

$$f_2(\mathbf{s}) = f_{2PP}(\mathbf{s}) \cdot f_{2PT}(\mathbf{s})$$

Przyjmując z kolei w naturalny sposób, że kolejne funkcje boole'owskie można określić następująco:

$f_{2PH} : B^2 \rightarrow B$ i $f_{2PH}(\mathbf{s}) = s_1$ – funkcja boole'owska nieszczelności PH ,

$f_{2OP} : B^2 \rightarrow B$ i $f_{2OP}(\mathbf{s}) = s_2$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_{HP} ,

$f_{2OT} : B^2 \rightarrow B$ i $f_{2OT}(\mathbf{s}) = s_3$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_{HT} ,

oraz z własności algebry Boole'a:

$$f_2(\mathbf{s}) = (s_1 + s_2)(s_1 + s_3) = s_1 + s_2s_3 \text{ (MAPN funkcji } f_2)$$

otrzymuje się w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich:

$$f_2(\mathbf{s}) = f_{2PH} + f_{2OP} \cdot f_{2OT}$$

W interpretacji technicznej wynika stąd, że niesprawność $HSUH_2$ ma miejsce wtedy i tylko wtedy, gdy nieszczelna jest pompa hamulcowa PH lub jednocześnie oba pozapompowe podobiegi hydrauliczne P_{HP} i P_{HT} hamulców przednich i tylnych.

Niesprawność $HSUH_2$ jest sumą boole'owską niesprawności pompy hamulcowej PH i iloczynu boole'owskiego nieszczelności pozapompowych podobiegów hydraulicznych hamulców przednich i tylnych.

Stąd na podstawie praw de Morgana funkcja szczelności $f_{2s} : B^3 \rightarrow B$ ma postać:

$$\begin{aligned} \overline{f_2(\mathbf{s})} = f_{2s}(\mathbf{s}) &= \overline{f_{2PH} + f_{2OP} \cdot f_{2OT}} = \left[\begin{array}{l} \overline{a+b} = \bar{a} \cdot \bar{b} \\ \overline{ab} = \bar{a} + \bar{b} \end{array} \right] = \overline{f_{2PH}(\mathbf{s})} \cdot \overline{f_{2OP}(\mathbf{s}) + f_{2OT}(\mathbf{s})} = \\ &= \overline{f_{2PH}(\mathbf{s})} \cdot \overline{f_{2OP}(\mathbf{s})} + \overline{f_{2PH}(\mathbf{s})} \cdot \overline{f_{2OT}(\mathbf{s})} = \left[\begin{array}{l} \overline{f_{2PH}} = f_{2SPH} - \text{funkcja szczelności } PH (f_{2SPH}(\mathbf{s}) = \bar{s}_1) \\ \overline{f_{2OP}} = f_{2SOP} - \text{funkcja szczelności } P_{HP} (f_{2SOP}(\mathbf{s}) = \bar{s}_2) \\ \overline{f_{2OT}} = f_{2SOT} - \text{funkcja szczelności } P_{HT} (f_{2SOT}(\mathbf{s}) = \bar{s}_3) \end{array} \right] = \\ &= f_{2SPH}(\mathbf{s}) \cdot f_{2SOP}(\mathbf{s}) + f_{2SPH}(\mathbf{s}) \cdot f_{2SOT}(\mathbf{s}) \end{aligned}$$

W interpretacji technicznej funkcji f_{2s} o sprawność $HSUH_2$ decyduje sprawność jednocześnie pompy hamulcowej PH i pozapompowego podobiegu hydraulicznego hamulców przednich P_{HP} lub jednocześnie sprawność pompy hamulcowej PH i pozapompowego podobiegu hydraulicznego hamulców tylnych P_{HT} .

Sprawność $HSUH_2$ jest sumą boole'owską iloczynów boole'owskich sprawności pompy hamulcowej przez sprawność podobiegu hydraulicznego hamulców przednich i odpowiednio przez sprawność podobiegu hydraulicznego hamulców tylnych.

2.3. Model $HSUH_3$ w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich

Niech:

$\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) \in B^5$ i $f_3 : B^5 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności modelu $HSUH_3 = (PH, (PP_{HP}, LP_{HP}), (PP_{HT}, LP_{HT}))$

Ponieważ:

$$f_3(\mathbf{u}) = (u_1 + u_2 + u_3)(u_4 + u_5)$$

to definiując funkcje boole'owskie:

$f_{3PP}(\mathbf{u}) = u_1 + u_2 + u_3; f_{3PP} : B^5 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_H lub PP_{HP} lub LP_{HP}

$f_{3PT}(\mathbf{u}) = u_4 + u_5; f_{3PT} : B^5 \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności P_H lub PP_{HT} lub LP_{HT}

wynika stąd, że funkcja boole'owska f_3 jest iloczynem funkcji boole'owskich postaci:

$$f_3(\mathbf{u}) = f_{3PP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3PT}(\mathbf{u})$$

Przyjmując z kolei w naturalny sposób, że dalsze funkcje boole'owskie można określić następująco:

$$f_{3PH} : B^5 \rightarrow B \text{ i } f_{3PH}(\mathbf{u}) = u_1 - \text{funkcja boole'owska nieszczelności } PH,$$

$f_{3OP} : B^5 \rightarrow B$ i $f_{3OP}(\mathbf{u}) = u_2 + u_3$ – funkcja boole'owska nieszczelności w hydraulicznym układzie hamulcowym osi przedniej tj. PP_{HP} lub LP_{HP} ,

$f_{3OPP}, f_{3OPL} : B^5 \rightarrow B$ i $f_{3OPP}(\mathbf{u}) = u_2, f_{3OPL}(\mathbf{u}) = u_3$ – funkcje boole'owskie nieszczelności odpowiednio PP_{HP} i LP_{HP} , oraz $f_{3OP}(\mathbf{u}) = f_{3OPP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u})$

$f_{3OT} : B^5 \rightarrow B$ i $f_{3OT}(\mathbf{u}) = u_4 + u_5$ – funkcje boole'owskie nieszczelności w hydraulicznym układzie hamulcowym osi tylnej tj. PP_{HT} i LP_{HT} ,

$f_{3OTP}, f_{3OTL} : B^5 \rightarrow B$ i $f_{3OTP}(\mathbf{u}) = u_4, f_{3OTL}(\mathbf{u}) = u_5$ – funkcje boole'owskie nieszczelności odpowiednio PP_{HT} i LP_{HT} .

Stąd z własności algebry Boole'a:

$$f_3(\mathbf{u}) = (u_1 + u_2 + u_3)(u_4 + u_5) = u_1 + (u_2 + u_3)(u_4 + u_5) \text{ (MAPN funkcji } f_3)$$

otrzymuje się w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich 5 zmiennych:

$$f_3(\mathbf{u}) = f_{3PH} + f_{3OP} \cdot f_{3OT}$$

Nieszczelność HSUH₃ jest sumą boole'owską funkcji nieszczelności pompy hamulcowej i iloczynu boole'owskiego funkcji nieszczelności hydraulicznego układu hamulcowego osi przedniej przez funkcje nieszczelności hydraulicznego układu hamulcowego osi tylnej.

W interpretacji technicznej funkcji $f_3 : B^5 \rightarrow B$ wynika stąd, że nieszczelność HSUH₃ ma miejsce wtedy i tylko wtedy, gdy nieszczelna jest pompa hamulcowa PH lub jednocześnie nieszczelne są lewy lub prawy podobieg hydrauliczny hamulców przednich LP_{HP} , PP_{HP} i podobieg hydrauliczny hamulców tylnych lewy lub prawy LP_{HT} , PP_{HT} .

Uzględniając bardziej szczegółową przestrzeń morfologiczną opisaną ciągiem $HSUH_3 = (PH, PP_{HP}, LP_{HP}, PP_{HT}, LP_{HT})$ otrzymuje się bardziej dokładny opis nieszczelności w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich rozpisany na wszystkie strony osi przedniej i tylnej.

$$f_3(\mathbf{u}) = f_{3PH}(\mathbf{u}) + f_{3OP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OT}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} f_{3OP}(\mathbf{u}) = f_{3OPP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u}) \\ f_{3OT}(\mathbf{u}) = f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OTL}(\mathbf{u}) \end{bmatrix} =$$

$$= f_{3PH}(\mathbf{u}) + (f_{3OPP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u})) \cdot (f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OTL}(\mathbf{u})) = [a(b+c) = ab+ac] =$$

$$= f_{3PH}(\mathbf{u}) + f_{3OPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTL}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTL}(\mathbf{u})$$

W interpretacji technicznej funkcji nieszczelności $f_3 : B^5 \rightarrow B$ w postaci pięciu składowych wynika, że obserwuje się nieszczelność HSUH₃ wtedy i tylko wtedy, gdy nieszczelna jest pompa hamulcowa oraz nieszczelne są co najmniej oba elementy

z następujących zbiorów dwuelementowych: $\{PP_{HP}, PP_{HT}\}$, $\{PP_{HP}, LP_{HT}\}$, $\{LP_{HP}, PP_{HT}\}$, $\{LP_{HP}, LP_{HT}\}$. Kontynuując przekształcenia funkcji f_3 (na podstawie praw de Morgana) otrzymuje się funkcję szczelności dla modelu HSUH₃:

$$\begin{aligned} \overline{f_3(\mathbf{u})} &= \overline{f_{3S}(\mathbf{u})} = \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) + f_{3OP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OT}(\mathbf{u})} = \left[\begin{array}{l} \overline{a+b} = \overline{a \cdot b} \\ \overline{ab} = \overline{a+b} \end{array} \right] = \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot (f_{3OP}(\mathbf{u}) + f_{3OT}(\mathbf{u}))} = \\ &= \overline{[a(b+c) = ab+ac]} = \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OP}(\mathbf{u}) + f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OT}(\mathbf{u})} = \\ &= \left[\begin{array}{l} \overline{f_{3PH}} = f_{3SPH} - \text{funkcja szczelności PH } (f_{3SPH}(\mathbf{u}) = \overline{u_1}) \\ \overline{f_{3OP}} = f_{3SOP} - \text{funkcja szczelności PP}_{HP} \text{ i LP}_{HP} (f_{3SOP}(\mathbf{u}) = \overline{u_2 u_3}) \\ \overline{f_{3OT}} = f_{3SOT} - \text{funkcja szczelności PP}_{HT} \text{ i LP}_{HT} (f_{3SOT}(\mathbf{u}) = \overline{u_4 u_5}) \end{array} \right] = \\ &= f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOP}(\mathbf{u}) + f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOT}(\mathbf{u}) \end{aligned}$$

W interpretacji technicznej funkcji boole'owskiej $f_{3S} : B^5 \rightarrow B$ można powiedzieć, że szczelność hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego w modelu HSUH₃ ma miejsce wtedy i tylko wtedy gdy szczelna jest pompa hamulcowa i jednocześnie podbieg hydrauliczny osi przedniej lub jest szczelna pompa hamulcowa i jednocześnie podbieg hydrauliczny osi tylnej.

Sprawność w modelu HSUH₃ jest sumą boole'owską iloczynów boole'owskich funkcji szczelności pompy hamulcowej przez funkcje szczelności podbiegów hydraulicznych osi przedniej i osi tylnej.

Przechodząc do kolejnej wersji szczegółowości przestrzeni morfologicznej opisującej HSUH₃ otrzymuje się następującą postać funkcji szczelności dla tego modelu:

$$\begin{aligned} \overline{f_{3S}(\mathbf{u})} &= \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) + (f_{3OPP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u})) \cdot (f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OTL}(\mathbf{u}))} = \left[\begin{array}{l} \overline{a+b} = \overline{a \cdot b} \\ \overline{ab} = \overline{a+b} \end{array} \right] = \\ &= \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot ((f_{3OPP}(\mathbf{u}) + f_{3OPL}(\mathbf{u})) + (f_{3OTP}(\mathbf{u}) + f_{3OTL}(\mathbf{u})))} = \\ &= \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot (f_{3OPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OPL}(\mathbf{u}) + f_{3OTP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTL}(\mathbf{u}))} = \\ &= \overline{f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OPL}(\mathbf{u}) + f_{3PH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3OTL}(\mathbf{u})} = \\ &= \left[\begin{array}{l} \overline{f_{3OPP}} = f_{3SOPP} - \text{funkcja szczelności PP}_{HP}, \overline{f_{3OTP}} = f_{3SOTP} - \text{funkcja szczelności PP}_{HT} \\ \overline{f_{3OPL}} = f_{3SOPL} - \text{funkcja szczelności LP}_{HP}, \overline{f_{3OTL}} = f_{3SOTL} - \text{funkcja szczelności LP}_{HT} \end{array} \right] = \\ &= f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOPL}(\mathbf{u}) + f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOTP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOTL}(\mathbf{u}) \end{aligned}$$

W interpretacji technicznej ze wzoru:

$$f_{3S}(\mathbf{u}) = f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOPP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOPL}(\mathbf{u}) + f_{3SPH}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOTP}(\mathbf{u}) \cdot f_{3SOTL}(\mathbf{u})$$

zapisanego w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich 5 zmiennych wynika, że szczelność HSUH₃ gwarantują szczelności wszystkich obiektów z ciągu (PH, PP_{HP}, LP_{HP}) lub z ciągu (PH, PP_{HT}, LP_{HT}) .

2.4. Model HSUH w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich

Niech:

$\mathbf{x} = (x_i)_{i=1}^{14} \in B^{14}$ i $f: B^{14} \rightarrow B$ – funkcja boole'owska nieszczelności modelu boole'owskiego HSUH.

Ponieważ:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^8 x_i \cdot (x_1 + x_2 + \sum_{j=9}^{14} x_j)$$

to definiując funkcje boole'owskie:

$$f_{PP}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^8 x_i; f_{PP}: B^{14} \rightarrow B \text{ – funkcja boole'owska nieszczelności elementów } UTT_{PH}$$

i K_{PH} pompy hamulcowej oraz elementów hydraulicznego układu hamulcowego osi przedniej

$$UTPP_{CH}, KPP_{CH}, PHPP_{CHP}, UTLP_{CH}, KLP_{CH}, PHLP_{CHP}$$

$$f_{PT}(\mathbf{x}) = x_1 + x_2 + \sum_{j=9}^{14} x_j; f_{PT}: B^{14} \rightarrow B \text{ – funkcja boole'owska nieszczelności}$$

elementów UTT_{PH} i K_{PH} pompy hamulcowej oraz elementów hydraulicznego układu

$$\text{hamulcowego osi tylnej } UTPT_{CH}, KPT_{CH}, PHPT_{CHP}, UTTL_{CH}, KLT_{CH}, PHLT_{CHP}$$

wynika stąd, że funkcja boole'owska f jest iloczynem funkcji boole'owskich f_{PP} i f_{PT} w ich algebrze Boole'a funkcji boole'owskich 14 zmiennych

$$f(\mathbf{x}) = f_{PP}(\mathbf{x}) \cdot f_{PT}(\mathbf{x})$$

Kontynuując przekształcenia boole'owskie formuły określającej funkcję boole'owską $f: B^{14} \rightarrow B$

$$f(\mathbf{x}) = (x_1 + x_2 + \sum_{i=3}^8 x_i)(x_1 + x_2 + \sum_{j=9}^{14} x_j) = \left[\begin{array}{l} a(b+c) = ab+ac \\ aa = a \\ a+ab = a \end{array} \right] = x_1 + x_2 + \sum_{i=3}^8 x_i \cdot \sum_{j=9}^{14} x_j$$

oraz formułując w naturalny sposób, wynikające z tego wzoru, kolejne funkcje boole'owskie:

$f_{PH}: B^{14} \rightarrow B$ i $f_{PH}(\mathbf{x}) = x_1 + x_2$ – funkcja boole'owska nieszczelności pompy hamulcowej PH w modelu HSUH,

$f_{OP} : B^{14} \rightarrow B$ i $f_{OP}(\mathbf{x}) = \sum_{i=3}^8 x_i$ – funkcja boole’owska nieszczelności wszystkich elementów hydraulicznego podobiegu w układzie hamulcowym osi przedniej,

$f_{OPP}, f_{OPL} : B^{14} \rightarrow B$, $f_{OPP}(\mathbf{x}) = \sum_{i=3}^5 x_i$, $f_{OPL}(\mathbf{x}) = \sum_{j=6}^8 x_j$ – funkcje boole’owskie nieszczelności odpowiednio w podciągach osi przedniej hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego:

$$(UTPP_{CH}, KPP_{CH}, PHPP_{CHP}) \text{ i } (UTLP_{CH}, KLP_{CH}, PHL P_{CHP}),$$

$f_{OTP}, f_{OTL} : B^{14} \rightarrow B$, $f_{OTP}(\mathbf{x}) = \sum_{i=9}^{11} x_i$, $f_{OTL}(\mathbf{x}) = \sum_{j=12}^{14} x_j$ – funkcje boole’owskie nieszczelności

odpowiednio w podciągach osi tylnej hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego:

$$(UTPT_{CH}, KPT_{CH}, PHPT_{CHP}) \text{ i } (UTLT_{CH}, KLT_{CH}, PHLT_{CH}),$$

$f_{OT} : B^{14} \rightarrow B$ i $f_{OT}(\mathbf{x}) = \sum_{j=9}^{14} x_j$ – funkcja boole’owska nieszczelności wszystkich elementów hydraulicznego podobiegu w układzie hamulcowym osi tylnej, otrzymuje się w algebrze Boole’a funkcji boole’owskich:

$$f(\mathbf{x}) = f_{PH}(\mathbf{x}) + f_{OP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OT}(\mathbf{x})$$

Czyli funkcja boole’owska nieszczelności w modelu boole’owskim HSUH jest sumą boole’owską funkcji nieszczelności f_{PH} pompy hamulcowej oraz iloczynu boole’owskiego dwóch funkcji boole’owskich nieszczelności hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego, odpowiednio osi przedniej i osi tylnej.

Uwzględniając bardziej szczegółową przestrzeń morfologiczną opisaną ciągiem HSUH otrzymuje się bardziej dokładny opis nieszczelności w algebrze Boole’a funkcji boole’owskich:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= f_{3PH}(\mathbf{x}) + f_{OP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OT}(\mathbf{x}) = \left[\begin{array}{l} f_{OP}(\mathbf{x}) = f_{OPP}(\mathbf{x}) + f_{OPL}(\mathbf{x}) \\ f_{OT}(\mathbf{x}) = f_{OTP}(\mathbf{x}) + f_{OTL}(\mathbf{x}) \end{array} \right] = \\ &= f_{PH}(\mathbf{x}) + (f_{OPP}(\mathbf{x}) + f_{OPL}(\mathbf{x})) \cdot (f_{OTP}(\mathbf{x}) + f_{OTL}(\mathbf{x})) = [a(b+c) = ab+ac] = \\ &= f_{PH}(\mathbf{x}) + f_{OPP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OTP}(\mathbf{x}) + f_{OPP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OTL}(\mathbf{x}) + f_{OPL}(\mathbf{x}) \cdot f_{OTP}(\mathbf{x}) + f_{OPL}(\mathbf{x}) \cdot f_{OTL}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

Interpretacja techniczna tego wzoru w algebrze Boole’a funkcji boole’owskich uwzględnia zarówno nieszczelności pompy hamulcowej jak również nieszczelności odpowiednich elementów dotyczących właściwych osi jak i ich stron.

Wzory w algebrze Boole’a funkcji boole’owskich 14 zmiennych boole’owskich określają bardziej już globalną strukturę diagnozowania szczelności. Kontynuując przekształcenia w algebrze Boole’a funkcji boole’owskich 14 zmiennych, otrzymuje się:

$$\overline{f(\mathbf{x})} = \overline{f_S(\mathbf{x})} = \overline{f_{3PH}(\mathbf{x}) + f_{OP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OT}(\mathbf{x})} = \left[\begin{array}{l} \overline{f_1 + f_2} = \overline{f_1} \cdot \overline{f_2} \\ \overline{f_1 f_2} = \overline{f_1} + \overline{f_2} \end{array} \right] = \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} \cdot (\overline{f_{OP}(\mathbf{x})} + \overline{f_{OT}(\mathbf{x})}) =$$

$$= [\overline{f_1(f_2 + f_3)} = \overline{f_1 f_2} + \overline{f_1 f_3}] = \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} \cdot \overline{f_{OP}(\mathbf{x})} + \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} \cdot \overline{f_{OT}(\mathbf{x})} =$$

$$= \left[\begin{array}{l} \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} = \overline{x_1 + x_2} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} = f_{SPH}(\mathbf{x}) - \text{funkcja boole'owska szczelnosci element\u00f3w} \\ \text{pompy hamulcowej} \\ \overline{f_{OP}(\mathbf{x})} = \overline{\sum_{i=3}^8 x_i} = \sum_{i=3}^8 \overline{x_i} = f_{SOP}(\mathbf{x}) - \text{funkcja boole'owska szczelnosci element\u00f3w} \\ \text{osi przedniej} \\ \overline{f_{OT}(\mathbf{x})} = \overline{\sum_{j=9}^{14} x_j} = \sum_{j=9}^{14} \overline{x_j} = f_{SOT}(\mathbf{x}) - \text{funkcja boole'owska szczelnosci element\u00f3w} \\ \text{osi tylnej} \end{array} \right] =$$

$$= f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOP}(\mathbf{x}) + f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOT}(\mathbf{x})$$

Czyli dla:

$$\mathbf{x} = (x_i)_{i=1}^{14} \wedge x_i \in B \wedge f_S : B^{14} \rightarrow B$$

jest funkcją szczelności w modelu boole'owskim HSUH oraz:

$$f_S(\mathbf{x}) = f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOP}(\mathbf{x}) + f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOT}(\mathbf{x})$$

Funkcja szczelności w modelu boole'owskim HSUH jest sumą boole'owską iloczyn\u00f3w boole'owskich funkcji boole'owskiej szczelności pompy hamulcowej przez odpowiednio funkcję szczelności osi przedniej i przez funkcję szczelności osi tylnej hydraulicznego samochodowego ukł\u00f3du hamulcowego.

Przechodząc do kolejnej wersji szczeg\u00f3łowości przestrzeni morfologicznej dla HSUH otrzymuje się następując\u00f1 postać funkcji szczelności:

$$\begin{aligned} \overline{f(\mathbf{x})} &= \overline{f_S(\mathbf{u})} = \overline{f_{PH}(\mathbf{u}) + (f_{OPP}(\mathbf{u}) + f_{OPL}(\mathbf{u})) \cdot (f_{OTP}(\mathbf{u}) + f_{OTL}(\mathbf{u}))} = \left[\begin{array}{l} \overline{a+b} = \overline{a \cdot b} \\ \overline{ab} = \overline{a+b} \end{array} \right] = \\ &= \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} \cdot \overline{(f_{OPP}(\mathbf{x}) + f_{OPL}(\mathbf{x})) + (f_{OTP}(\mathbf{x}) + f_{OTL}(\mathbf{x}))} = \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} \cdot \overline{f_{OPP}(\mathbf{x})} \cdot \overline{f_{OPL}(\mathbf{x})} + \\ &+ \overline{f_{OTP}(\mathbf{x})} \cdot \overline{f_{OTL}(\mathbf{x})} = \left[\begin{array}{l} \overline{f_{PH}(\mathbf{x})} = f_{SPH}(\mathbf{x}) - \text{funkcja szczelności PH} \\ \overline{f_{OPP}(\mathbf{x})} = f_{SOPP}(\mathbf{x}) - \text{funkcja szczelności PP}_{HP} \\ \overline{f_{OPL}(\mathbf{x})} = f_{SOPL}(\mathbf{x}) - \text{funkcja szczelności LP}_{HP} \\ \overline{f_{OTP}(\mathbf{x})} = f_{SOTP}(\mathbf{x}) - \text{funkcja szczelności PP}_{HT} \\ \overline{f_{OTL}(\mathbf{x})} = f_{SOTL}(\mathbf{x}) - \text{funkcja szczelności LP}_{HT} \end{array} \right] = \\ &= f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOPP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OPL}(\mathbf{x}) + f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOTP}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOTL}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

Czyli:

$$f_S(\mathbf{x}) = f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOPP}(\mathbf{x}) \cdot f_{OPL}(\mathbf{x}) + f_{SPH}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOTP}(\mathbf{x}) \cdot f_{SOTL}(\mathbf{x})$$

W interpretacji technicznej tego równania w algebrze Boole'a funkcji boole'owskich można stwierdzić, że szczelność hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego w modelu HSUH jest uwarunkowana jednoczesną szczelnością bądź wszystkich elementów pompy hamulcowej i podobiegów hydraulicznych układu hamulcowego obu stron osi przedniej, bądź szczelnością wszystkich elementów pompy hamulcowej i podobiegów hydraulicznych układu hamulcowego obu stron osi tylnej.

3. Podsumowanie

Brak szczelności obiegu hydraulicznego hamulca roboczego w pojazdach samochodowych sprawia, że obiekt przechodzi ze stanu zdatności technicznej w stan niezdatności, nieklasyfikujący go do dalszej eksploatacji. Na skutek tego zjawiska dochodzi bowiem do utraty skuteczności sił hamowania. Wzrokowe sprawdzenie poziomu płynu hamulcowego oraz wyszukiwanie śladów przecieków nie gwarantuje skutecznej kontroli stanu układu hamulcowego, ponieważ w ten sposób nie jest możliwe wykrycie małych nieszczelności, szczególnie zlokalizowanych w niewidocznych miejscach [24]. Dlatego dokładna ocena jego szczelności jest możliwa dopiero za pomocą specjalnych przyrządów w warsztatach samochodowych lub na Stacjach Kontroli Pojazdów

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie metody procesu diagnozowania nieszczelności obiegu hydraulicznego na potrzeby zaprojektowania pokładowego diagnosty wybranych uszkodzeń mechanizmów hamulcowych. Przedstawiony w artykule model matematyczny procesu diagnozowania oparty na funkcjach boole'owskich jest częścią prowadzonych analiz matematycznych i dotyczy procesu badania nieszczelności w układach hamulcowych sterowanych hydraulicznie.

Na podstawie analizy struktury opracowano podstawowe składowe przestrzeni morfologicznej trzech pośrednich modeli matematycznych struktury procesu diagnozowania oraz model docelowy 14 składowych. Funkcje boole'owskie $f, f_s : B^{14} \rightarrow B$ wprowadzają strukturę opisującą naturalną diagnostykę wstępną HSUH z punktu widzenia nieszczelności/szczelności pompy hamulcowej, pozapompowych podobiegów hydraulicznych hamulców przedniej i tylnej osi oraz ich obu stron – lewej i prawej. Tym samym pozwalają analizować problematykę nieszczelności/szczelności w różnych przekrojach szczegółowości wyłonionych w trakcie badań wstępnych modeli HSUH_i $i \in 1..3$, poprzez dekompozycję HSUH metodą morfologiczną.

W ramach projektowania systemu diagnostycznego będą zaprojektowane czujniki pomiarowe wykrywające np. spadek ciśnienia płynu hamulcowego, sygnalizujące o uszkodzeniu układu czyli przejścia ze stanu zdatności w stan niezdatności technicznej. System będzie ponadto posiadał wbudowaną mapę diagnostyczną zaprojektowaną dla wybranej grupy pojazdów na podstawie schematu ideowo-konstrukcyjnego układu hamulcowego i prowadzonych analiz matematycznych, informując użytkownika pojazdu o uszkodzeniu układu i miejscu, w którym doszło do uszkodzenia.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają realizację celu, jak również umożliwiają sformułowanie wytycznych do dalszego etapu analiz struktury diagnozowania i jej minimalizacji. Uzyskane wyniki strukturalizacji mogą znaleźć zastosowanie w automatyzacji i robotyzacji procesu diagnozowania nieszczelności/szczelności hydraulicznego samochodowego układu hamulcowego.

Literatura

- [1] Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych, praca zbiorowa (red. Niziński S), Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
- [2] Hebda M, Niziński S, Pelc H. Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych, WKŁ, Warszawa 1984.
- [3] Idzikowski A. Efektywność działania hydraulicznych układów hamulcowych w pojazdach samochodowych, [w:] Efektywność wykorzystania maszyn roboczych i urządzeń w przemyśle, Monografia, red. nauk. Idzikowski A. Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
- [4] Idzikowski A. Metod of diagnosing leakages in working hydraulic brake circuit in Automotive vehicles, [w:] Machinery and Equipment Safety in Industry. Monograph. Scientific Editor Idzikowski A. Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
- [5] Idzikowski A, Salamon S. The Application of Boolean Algebra in Modelling of Leakage Condition of a Car Hydraulic Braking System. International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2013; 18(2).
- [6] Idzikowski A, Salamon S. Visual Inspection of Braking System Elements' Technical Condition in Motor Vehicles. Chapter 9, W: Research Methods Improvement. Monography. Ed. and Scientific Elaboration Stanisław Borkowski, Józef Jasiński, Dnipropetrovsk 2010.

- [7] Idzikowski A. Braking System Design Solutions in Mechanical Vehicles - Visual Inspection of Technical Condition. Kvalita a Spol'ahlivost Technickych Systemov. Quality and Reliability of Technical Systems. Zbornik vedeckych prac, Nitra 2011.
- [8] Idzikowski A. Stan techniczny i wyposażenie pojazdów samochodowych a bezpieczeństwo ruchu drogowego, Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą nr 46, Bydgoszcz 2011.
- [9] Informator techniczny Bosch. Układ stabilizacji toru jazdy, WKiŁ. Warszawa 2000.
- [10] Marek W, Orzyszkiewicz J. Elementy logiki i teorii mnogości w zadaniach, PWN, Warszawa, 2003.
- [11] Mechanik pojazdów samochodowych – budowa i eksploatacja pojazdów, pod redakcją Kozłowskiego M.: część I, Wyd. Vogel, Wrocław 1997.
- [12] Mechanik pojazdów samochodowych – budowa i eksploatacja pojazdów, pod redakcją Kozłowskiego M.: część II, Wyd. Vogel, Wrocław 1998.
- [13] Miatłuk M, Kamiński Z. Układy hamulcowe pojazdów. Obliczenia, Wydawnictwa PB. Białystok 2005.
- [14] Mostowski A W. Algebry Boole'a i ich zastosowanie, PWN, Warszawa, 1964.
- [15] Partyka M. A, Koziarska A, Besler A. Wybrane zagadnienia minimalizacji funkcji boole'owskich w strukturalizacji procesów decyzyjnych, Oficyna Wydawnicza, Opole 2001.
- [16] Partyka M A. Logika systemów projektowania na przykładzie CAD układów maszynowych, Studia i monografie z. 105, Oficyna Wydawnicza, Opole 1999.
- [17] Partyka M A. Metodologia projektowania – wybrane zagadnienia projektowania technicznego, skrypt nr 239, Oficyna Wydawnicza, Opole 2001.
- [18] Partyka M A. Algorytm Quine'a McCluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych, Studia i monografie z. 109, Oficyna Wydawnicza, Opole 1999.
- [19] Reński A. Budowa samochodu. Układy hamulcowe i kierownicze, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [20] Salamon S, Idzikowski A. An influence of usage of reliability selected elements of break system, 14 Międzynarodna Vedecka Konferencja, Nitra 2009.
- [21] Schwall L. M, Baker B, Gerdes J. C, Forhert T. A probabilistic Vehicle Diagnostic System Using Multiple Models, American Association for Artificial Intelligence, 2003.
- [22] Sitek K, Syta S. Pojazdy samochodowe. Badania i diagnostyka, WKŁ, Warszawa 2010.
- [23] Sitek K. Diagnostyka samochodowa. Układy odpowiedzialne za bezpieczeństwo jazdy, Wydawnictwo Auto, Warszawa 1999.
- [24] Trzeciak K. Diagnostyka samochodów osobowych, WKŁ, Warszawa 2008.
- [25] Wrzeński T. Hamowanie pojazdów samochodowych, WKŁ, Warszawa, 1978.