

Sebastian RÓŻOWICZ<sup>1</sup>

### **WPLYW REZYSTANCJI PRZEWODÓW WYSOKIEGO NAPIĘCIA NA WARTOŚĆ ENERGII WYŁADOWANIA ISKROWEGO**

*W artykule przedstawiono model matematyczny bezrozdzielaczowego układu zapłonowego współpracujący z silnikami spalinowymi. Zaproponowany model wykorzystano do analizy wartości poszczególnych elementów konstrukcyjnych układu zapłonowego. Do opracowania modeli matematycznych wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych elementów składowych układu zapłonowego. Komputerową analizę układu przeprowadzono na podstawie opracowanego programu autorskiego zaimplementowanego w środowisku Delphi. Dokonano analizy zmiany wartości rezystancji przewodów wysokiego napięcia dla wyznaczenia wartości napięcia i prądu na świecy zapłonowej.*

### **INFLUENCE OF HIGH VOLTAGE WIRES RESISTANCE ON VALUE OF SPARK DISCHARGE ENERGY**

*Mathematical model of a battery contactless ignition system co-operating with combustion engines has been presented in the paper. The proposed model has been used for selection of construction parameters of the ignition system elements. Results of laboratory and exploitation experiments of the components of the ignition system, as well as the whole ignition system (real object), co-operating with other units of the vehicle electrical equipment, have been employed in elaboration of the mathematical model.*

## **1. WPROWADZENIE**

Praca silnika spalinowego uzależniona jest od poprawnej pracy układu zapłonowego, bowiem proces spalania w silniku a w konsekwencji moc, moment obrotowy, zużycie paliwa i toksyczność spalin zależą od energii wyładowania iskrowego oraz kąta wyprzedzenia zapłonu.

Prowadzone badania mają na celu optymalizację parametrów wyładowania iskrowego, dla uzyskania założonych efektów pracy silnika. W wyniku przeprowadzonych w tym zakresie prac konstrukcyjnych powstało wiele rozwiązań układów zapłonowych z wykorzystaniem elementów elektronicznych, jak również sterowników jako centralnej

---

<sup>1</sup> mgr inż. Sebastian Różowicz – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Świetlnej, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

jednostki komputerowej nadzorującej i sterującej procesem spalania mieszanki paliwowo powietrznej.

Wykonanie elektronicznego rozdzielacza zapłonu z uwagi na ograniczone możliwości elementów elektronicznych, które pracowałyby w obwodach o napięciu 30÷40kV jest z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalne.

W rozwiązaniach praktycznych stosujemy, więc układy bezrozdzielaczowe, z których wysokie napięcie doprowadzone jest bezpośrednio do świec zapłonowych.

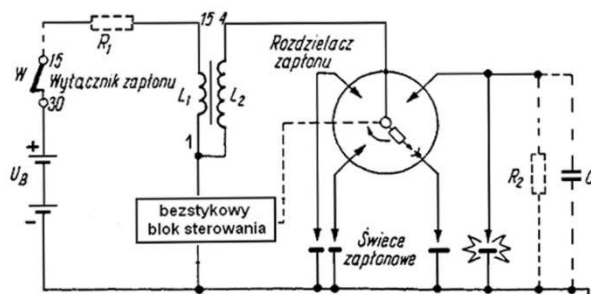
Stosowanie domieszek antydetonacyjnych do paliwa związane jest ze stopniem sprężania, powoduje odkładanie się produktów spalania na izolatorze świecy zapłonowej bocznikując przerwę międzyelektrodową. Bocznik ten zmniejsza energię wyładowania a niekiedy może powodować „wypadania zapłonów”, co zwiększa zużycie paliwa i toksyczność spalin.

Choć zastąpienie mechanicznego przerywacza przez różnego typu układy bezstykowe z czujnikami magnetoindukcyjnymi, hallotronowymi lub optycznymi nie stwarza większych problemów, to próby wyeliminowania mechanicznego rozdzielacza zapłonu napotyka na poważne trudności. Przeszkodę tę można ominąć przez stosowanie oddzielnej cewki zapłonowej dla każdej świecy – funkcję rozdzielacza przejmują wtedy urządzenia elektroniczne pracujące po stronie uzwojenia pierwotnego cewki. Poprawę parametrów układu zapłonowego można uzyskać poprzez zmianę parametrów cewki zapłonowej obniżając straty w rdzeniu.

W referacie przedstawiono metodę symulacyjnego wyznaczania wpływu zmian parametrów obwodu na pracę układu zapłonowego. Metoda ta polega na zastąpieniu rzeczywistego obiektu modelem matematycznym, na którym przeprowadza się wstępne badania. Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie dokonano cyfrowej symulacji pracy układu zapłonowego, a w kolejnym porównano otrzymane wyniki z wynikami badań rzeczywistego układu zapłonowego.

## 2. ZAŁOŻENIA DO MODELI MATEMATYCZNYCH UKŁADU ZAPŁONOWEGO

Schemat ideowy układu zapłonowego przedstawiono na rys. 1 [4].



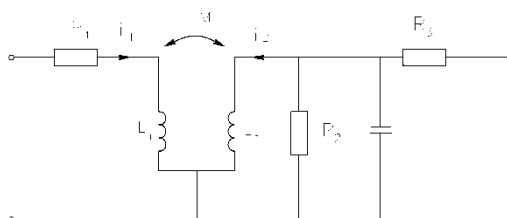
Rys. 1. Schemat ideowy układu zapłonowego,  $U_b$  - napięcie akumulatora,  $W$  - wyłącznik zapłonu,  $R_1$  - rezystancja przewodów obwodu pierwotnego i uzwojenia pierwotnego cewki,

$L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki,  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki,  $C_2$  - pojemność własna obwodu wtórnego cewki odwzorowująca występujące w układzie rzeczywistym rozłożenie pojemności między poszczególnymi zwojami cewki, oraz przewodami wysokiego napięcia w stosunku do masy pojazdu,  $R_2$  - rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu cewki, Blok sterowania - parametryczny lub generacyjny.

Dla potrzeb konstrukcji modelu matematycznego przyjęto następujące założenia upraszczające:

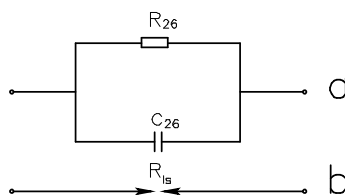
- zastąpiono układ o stałych rozłożonych układem zastępczym o stałych skupionych,
- przyjęto schematy zastępcze cewki zapłonowej oraz świecy zapłonowej,
- przyjęto, że napięcie początkowe wyładowania jest równe napięciu przeskoku na świecy.

Na podstawie wstępnych badań ustalono, że najbardziej odpowiedni jest schemat zastępczy cewki zapłonowej w układzie jak na rys. 2. [6].



Rys. 2. Schemat zastępczy cewki zapłonowej,  $R_1$  - rezystancja uzwojenia pierwotnego cewki,  $R_2$  - rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu cewki,  $R_3$  - rezystancja uzwojenia wtórnego cewki wraz z rezystorem przeciwwzrostowym w palcu rozdzielacza zapłonu,  $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego,  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego,  $C_2$  - pojemność własna obwodu wtórnego cewki odwzorowująca występujące w układzie rzeczywistym rozłożenie pojemności między poszczególnymi zwojami cewki, oraz przewodami wysokiego napięcia w stosunku do masy pojazdu,  $k$  - współczynnik sprzężenia magnetycznego między uzwojeniami,  $M$  - indukcyjność wzajemna.

Dla świecy zapłonowej przyjęto schemat zastępczy przedstawiony na rys. 3. [6].



Rys. 3. Schemat zastępczy świecy zapłonowej,  $R_{26}$  - rezystancja własna oraz zanieczyszczenia bocznikujące przerwę między elektrodami,  $C_{26}$  - pojemność zastępcza świecy,  $R_{18}$  - rezystancja podczas wyładowania między elektrodami świecy.

Dla fazy wzrostu napięcia przyłożonego do świecy zapłonowej przyjęto schemat zastępczy przedstawiony na (rys. 3. „a”). Dla takiego stanu pracy świecę zastąpiono

kondensatorem płaskim o pojemności  $C_{26}$  oraz rezystancji  $R_{26}$  obrazującej gromadzące się na jej izolatorze produkty spalania. Po przekroczeniu napięcia przeskoku nastąpi wyładowanie elektryczne. Dla takiego stanu przyjęto schemat przedstawiony na (rys. 3. „b”), obrazujący nieliniową rezystancję łuku elektrycznego.

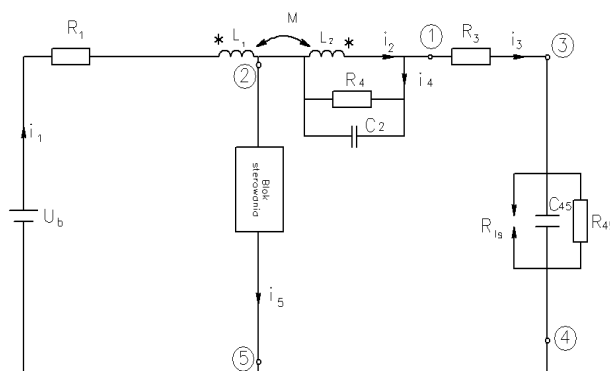
Dodatkowo przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pominięto indukcyjność przewodów po stronie wysokiego napięcia. Wobec bardzo dużej indukcyjności  $L_2$  indukcyjność przewodów nie ma wpływu na charakter wyładowania,
- pominięto rezystancję przewodów wysokiego napięcia. Rezystancja stosowanych przewodów zapłonowych jest pomijalnie mała w stosunku do rezystancji uzwojenia wtórnego cewki zapłonowej i stosowanego rezystora przeciwzakłócenieniowego (rezystancje przewodów wysokiego napięcia możemy pominąć dla układów zapłonowych klasycznych, a dla układów zapłonowych nowego typu należy ją uwzględnić w obliczeniach),
- przyjęto, iż napięcie początkowe wyładowania równa się napięciu przeskoku świecy,
- czas trwania wyładowania uzależniony jest od energii zgromadzonej w cewce.

Wyładowanie między elektrodami świecy uzależnione jest od wartości napięcia przeskoku, a jego czas zależy od wartości energii zgromadzonej w cewce zapłonowej.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU ZAPŁONOWEGO BEZSTYKOWEGO

W oparciu o powyższe założenia i schematy zastępcze przyjęto do badań układ zapłonowy przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy układu zapłonowego bezrozdzielcowego bezstykowego,  $U_b$  - napięcie akumulatora,  $R_1$  - rezystancja przewodów obwodu pierwotnego i uzwojenia pierwotnego cewki,  $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki,  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki,  $M$  - indukcyjność wzajemna uzwojeń cewki,  $R_4$  - rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu cewki,  $R_3$  - ograniczenie zakłóceń radioelektrycznych ( $5k\Omega$ ),  $R_{45}$  - rezystancja upływnościowa świecy,  $R_{is}$  - rezystancja świecy podczas wyładowania,  $C_2$  - pojemność własna cewki,  $C_{45}$  - pojemność własna świecy, blok sterowania - parametryczny lub generacyjny.

Układ zapłonowy opisano następującymi równaniami:

$$\begin{aligned}
 i_2 &= i_{R_2} + i_{C_2} + i_3 & i_{C_{45}} &= C_{45} \frac{du_{C_{45}}}{dt} \\
 i_{C_2} &= C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} & i_3 &= i_{C_{45}} + i_{R_{45}} \\
 u_{C_2} = u_{L_2} &= R_2 i_{R_2} = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} & U_b - R_1 \cdot i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= 0 \\
 R_{45} \cdot i_{R_{45}} &= u_{C_{45}} & u_{C_2} + R_3 \cdot i_3 + u_{C_{45}} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Rozwiązaniem powyższych równań jest równanie charakterystyczne:

$$\begin{aligned}
 A \cdot \frac{d^4 u_{C_{45}}}{dt^4} + B \cdot \frac{d^3 u_{C_{45}}}{dt^3} + C \cdot \frac{d^2 u_{C_{45}}}{dt^2} + D \cdot \frac{du_{C_{45}}}{dt} + E \cdot u_{C_{45}} &= 0 \\
 A \cdot p^4 + B \cdot p^3 + C \cdot p^2 + D \cdot p + E &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Parametrami równania charakterystycznego są równania:

$$\begin{aligned}
 A &= \left( R_3 C_{45} \frac{L_1 L_2 C_2}{M} - M R_3 C_2 C_{45} \right) \\
 B &= R_3 C_{45} \left( \frac{R_1 L_2 C_2}{M} + \frac{L_1 L_2}{R_2 M} \right) + \frac{R_3}{R_{45}} \frac{L_1 L_2 C_2}{M} + \frac{L_1 L_2 C_2}{M} - \frac{L_1 L_2 C_{45}}{M} - \frac{M R_3 C_2}{R_{45}} - M C_2 + M C_{45} - \frac{M R_3 C_{45}}{R_2} \\
 C &= -\frac{R_1 L_2 C_{45}}{M} - \frac{L_1 L_2}{R_{45} M} - \frac{M R_3}{R_2 R_{45}} - \frac{M}{R_2} + \frac{M}{R_{45}} - R_3 C_{45} \left( \frac{L_1}{M} - \frac{R_1 L_2}{R_2 M} \right) + \frac{R_3}{R_{45}} \left( \frac{R_1 L_2 C_2}{M} + \frac{L_1 L_2}{R_2 M} \right) + \left( \frac{R_1 L_2 C_2}{M} + \frac{L_1 L_2}{R_2 M} \right) \\
 D &= -\frac{R_1 R_3 C_{45}}{M} - \left( \frac{L_1}{M} - \frac{R_1 L_2}{R_2 M} \right) \left( 1 + \frac{R_3}{R_{45}} \right) - \frac{R_1 L_2}{R_{45} M} \\
 E &= -\frac{R_1}{M} \left( 1 + \frac{R_3}{R_{45}} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

warunki początkowe:

$$\begin{aligned}
 u_{C_{45}}(0^+), \frac{du_{C_{45}}(0^+)}{dt}, \frac{d^2 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^2}, \frac{d^3 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^3} \\
 u_{C_{45}}(0^+) = 0, \frac{du_{C_{45}}(0^+)}{dt} = 0, \frac{d^2 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^2} = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\frac{d^3 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^3} = -\frac{U_b M}{R_3 C_{45} C_2 (L_1 L_2 - M^2)} = 1,4 \cdot 10^{18} \tag{5}$$

Podstawiając warunki początkowe do równania charakterystycznego otrzymano napięcie na świecy zapłonowej.

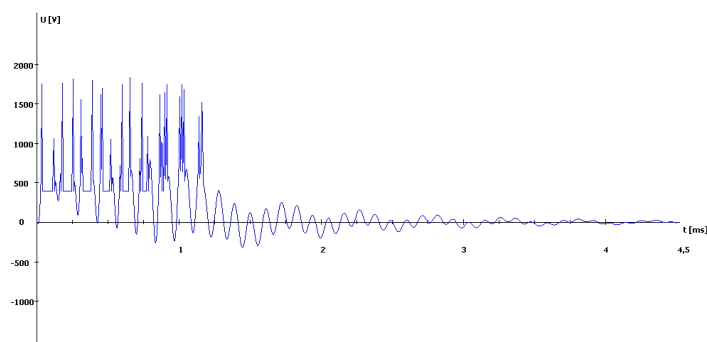
$$U_{45} = e^{(r_1 \cdot t)} \cdot (F_1 \cos(u_1 \cdot t) + F_2 \sin(u_1 \cdot t)) + e^{(r_2 \cdot t)} \cdot (F_3 \cos(u_3 \cdot t) + F_4 \sin(u_2 \cdot t)) \quad (6)$$

#### 4. PRZEBIEGI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

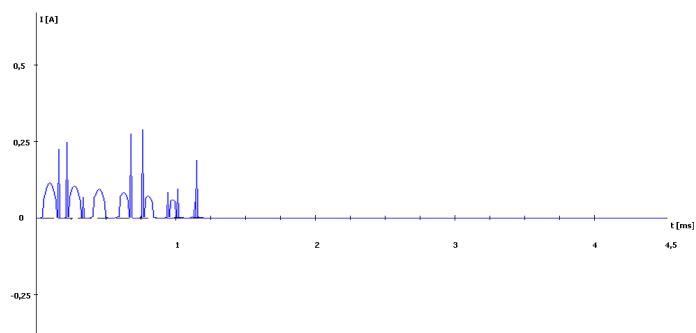
Przy pomocy symulacji komputerowej wyznaczono przebiegi napięcia na świecy oraz prąd wyładowania iskrowego dla rezystancji  $R_3=6400$  Ohm.

Component	Value	Unit	Component	Value	Unit
C1	0,25	uF	M	0,57	H
C2	100	pF	Uzs	1900	V
C26	20	pF	Uls	400	V
R1	2,8	Ohm	Ugs	280	V
<b>R3</b>	<b>6400</b>	<b>Ohm</b>	Uzr	1500	V
R4	50	MOhm	Ulr	600	V
R25	5	MOhm	Igs	50	mA
R26	0,5	MOhm	d	0,3	-
L1	0,01	H	t1	0,9	ms
L2	40	H	dt	0,1	us
k	0,9	-	te	0,1	ms

Rys. 5. Parametry układu zapłonowego wykorzystane w programie zaimplementowanym w środowisku Delphi.



Rys.6. Napięcie na świecy zapłonowej dla rezystancji  $R_3=6400$  Ohm.



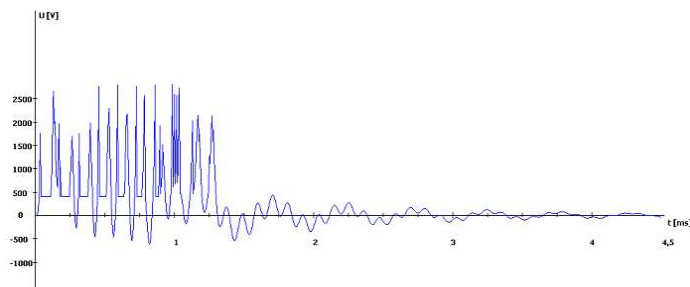
Rys.7. Prąd wyładowania iskrowego dla rezystancji  $R_3=6400$  Ohm.

Przebiegi napięcia na świecy oraz prąd wyładowania iskrowego dla rezystancji  $R_3=3000$  Ohm.

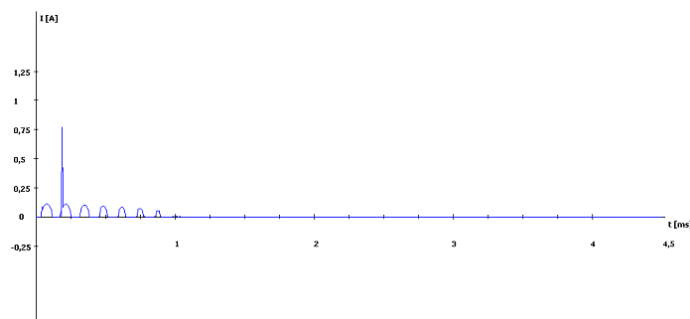
The screenshot shows a window titled "Dane" with a lightning bolt icon and a close button. It contains two columns of input fields for various circuit parameters. The value "3000" in the field for R3 is circled in red.

C1	0,25	uF	M	0,57	H
C2	100	pF	Uzs	1900	V
C26	20	pF	Uls	400	V
R1	2,8	Ohm	Ugs	280	V
R3	3000	Ohm	Uzr	1500	V
R4	50	MOhm	Ulr	600	V
R25	5	MOhm	Igs	50	mA
R26	0,5	MOhm	d	0,3	-
L1	0,01	H	t1	0,9	ms
L2	40	H	dt	0,1	us
k	0,9	-	te	0,1	ms

Rys.8. Parametry układu zapłonowego wykorzystane w programie zaimplementowanym w środowisku Delphi.



Rys.9. Napięcie na świecy zapłonowej dla rezystancji  $R_3=3000\text{ Ohm}$ .



Rys.10. Prąd wyładowania iskrowego dla rezystancji  $R_3=3000\text{ Ohm}$ .

## 5. WNIOSKI

Badania eksperymentalne dla różnych wartości rezystancji przewodów wysokiego napięcia potwierdziły przydatność przyjętego modelu matematycznego.

Zweryfikowany eksperymentalnie, a więc poprawny, model matematyczny jest bardzo użyteczny i może być praktycznie wykorzystany. Za jego pomocą można symulacyjne optymalizować parametry obwodu zapłonowego. Jest to szczególnie istotne, ponieważ rozwój technologiczny i wymogi środowiska naturalnego wymuszają taki dobór parametrów układów elektronicznych sterujących pracą silnika, który zagwarantuje najbardziej ekonomiczne i ekologiczne warunki pracy.

Zmniejszenie wartości rezystancji przewodów wysokiego napięcia z  $6400\Omega$  do  $3000\Omega$  wpływa znacząco na wzrost napięcia i prądu wyładowania iskrowego. Energia wyładowania iskrowego wzrasta do 20% (wyniki badań rozdział 4) co ma bardzo duży wpływ zarówno na ochronę środowiska i zmniejszenie zużycia paliwa.

Opracowany model matematyczny zweryfikowany przez badania eksperymentalne może stanowić cenną pomoc przy analizie i doborze parametrów układu zapłonowego. Analizy i badania symulacyjne znacznie tańsze od badań eksploatacyjno-trwałościowych stanowią cenne źródło informacji o obiektach technicznych.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Herner A.: *Elektronika w samochodzie*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- [2] Yastrebov A. I., Gad S., Słoń G., Zawadzki A.: *Analysis of computer intelligent diagnostic models In automotive vehicle's electrical equipment*. Proc. of the 15th international Conference on Systems Science, Systems ScienceXV Vol. III. Wrocław 2004.
- [3] Gad S., Yastribov A., Grzywaczewski M.: *Methods and Algorithms of Diagnostic Identification of Car Electrical Systems*. MMAR Międzyzdroje 1997.
- [4] Konopiński M.: *Elektrotechnika w technice motoryzacyjnej*. WKŁ Warszawa 1987.
- [5] Szulborski A.: *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym*. WKŁ Warszawa 2004.
- [6] Herner A., Riehl H.J.: *Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych*. WKŁ Warszawa 2003
- [7] Niziński S.: *Eksploatacja obiektów technicznych*, ITeE, Radom 2002.
- [8] Szkudziński R., Olech A.: *Klasyczna i komputerowa diagnostyka wybranych układów elektrycznych samochodów osobowych*, Praca dyplomowa, Politechnika Rzeszowska 2001.
- [9] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wyd.Art., Bydgoszcz 1996.