

Komputerowe metody wyznaczania parametrów układu zapłonowego

MARIUSZ DELĄG, SEBASTIAN RÓŻOWICZ

Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

W artykule przedstawiono model matematyczny baterijnego układu zapłonowego współpracującego z silnikami spalinowymi. Zaproponowany model wykorzystano do doboru parametrów konstrukcyjnych elementów układu zapłonowego. Do opracowania modelu matematycznego wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych (na obiekcie rzeczywistym) elementów składowych układu zapłonowego. Komputerową analizę układu przeprowadzono na podstawie zbudowanego schematu operatorowego w programie Simulink oraz programu zaimplementowanego w środowisku Delphi. Dokonano porównania i weryfikacji wyników zdjętych na obiekcie rzeczywistym z wynikami otrzymanymi z dwóch różnych symulacji komputerowych.

1. Wprowadzenie

Ciągły rozwój przemysłu motoryzacyjnego wymusił wiele zmian w konstrukcji, technologii i eksploatacji urządzeń wchodzących w skład pojazdów, zwłaszcza w zakresie wyposażenia elektrycznego i elektronicznego. Odpowiednio dobrane parametry urządzeń elektrycznych w znacznym stopniu decydują o poprawnej eksploatacji pojazdu. Zadaniem układu zapłonowego jest zapewnienie właściwej energii wyładowania iskrowego o dużej częstotliwości, stabilności i odpowiednio długim czasie, co w efekcie przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa i toksyczności spalin. Stosowanie domieszek antydetonacyjnych w paliwie jest przyczyną odkładania się produktów spalania na izolatorze świecy. Zmniejsza to energię wyładowania, a niekiedy nawet uniemożliwia zapłon mieszanki.

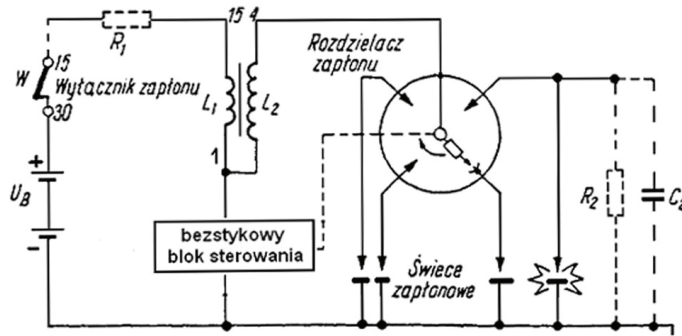
Badania prowadzone w wielu ośrodkach na świecy zmierzają do optymalizacji pracy układu zapłonowego przez wyeliminowanie elementów mechanicznych. Choć zastąpienie mechanicznego przerywacza przez różnego typu układy bezstykowe z czujnikami magnetoindukcyjnymi, hallotronowymi lub optycznymi nie stwarza większych problemów, to próby wyeliminowania mechanicznego rozdzielacza zapłonu napotykają 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.

Wymagania do układu zapłonowego ciągle rosną, zarówno z punktu widzenia napięcia wtórnego, jak i z punktu widzenia trwałości i niezawodności działania.

W artykule 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 modelu matematycznego układu zapłonowego

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



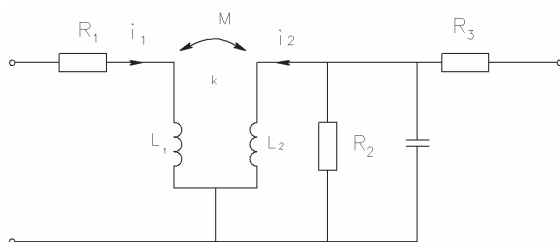
Rys. 1. Schemat ideowy układu zapłonowego: U_b - napięcie akumulatora, W - wyłącznik zapłonu, R_1 - rezystancja przewodów obwodu pierwotnego i uzwojenia pierwotnego cewki, L_1 - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki, L_2 - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki, C_2 - pojemność własna obwodu wtórnego 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.

Fig. 1. Scheme of ignition system. U_b - battery voltage, W - ignition switch, R_1 - resistance of primal circuit and primal coil, L_1 - induction of primal coil, L_2 - induction of secondary coil, C_2 - capacity of secondary coil circuit, R_2 - coil resistance, control unit.

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.

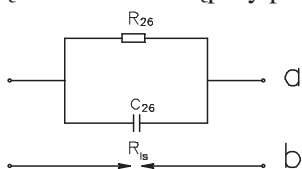
Na podstawie wstępnych badań ustalono, że najbardziej odpowiedni jest schemat zastępczy cewki zapłonowej w układzie jak na rysunku 2 [6].



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 przeciwzakłóceniovym 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.

Fig. 2. Substitute scheme of ignition coil. R_1 – resistance of primal coil, R_2 – loss in coil core, R_3 – resistance of secondary coil together with anti-interference resistor, L_1 – induction of primal circuit, L_2 – induction of secondary circuit, C_2 – capacity of secondary circuit, M – mutual inductance.

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



Rys. 3. Schemat zastępczy świecy zapłonowej: R_{26} – rezystancja własna oraz zanieczyszczenia bocznikujące przerwę między elektrodami, C_{26} – pojemność zastępcza świecy, R_{1s} – rezystancja podczas wyładowania między elektrodami świecy.

Fig. 3. Substitute scheme of spark plug: R_{26} – resistance, C_{26} – capacity of spark plug, R_{1s} – resistance during discharge.

Dla fazy wzrostu napięcia przyłożonego do świecy zapłonowej przyjęto schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 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 rysunku 3.b, obrazujący nieliniową rezystancję łuku elektrycznego.

Dodatkowo przyjęto następujące założenia upraszczające:

1. Pominięto indukcyjność przewodów po stronie wysokiego napięcia. Wobec bardzo dużej indukcyjności L_2 indukcyjność przewodów nie ma wpływu na charakter wyładowania.
2. Pominięto rezystancję przewodów wysokiego napięcia. Rezystancja stosowanych przewodów zapłonowych jest pomijalnie mała w stosunku do rezystancji uzwojenia wtórnego cewki zapłonowej i stosowanego rezystora przeciwzakłóceniovego (rezystancje przewodów wysokiego napięcia można pominąć dla układów zapło-

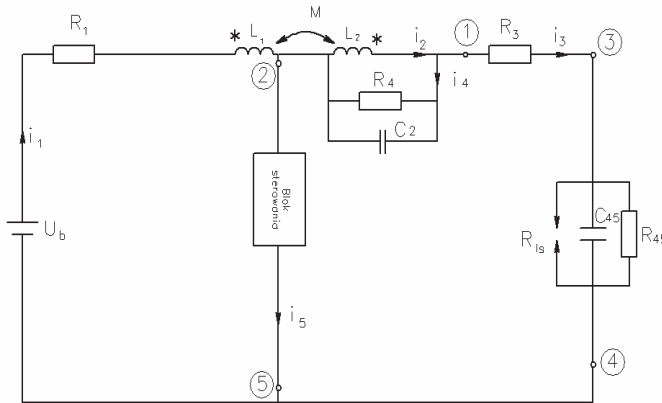
nowych klasycznych, a dla układów zapłonowych nowego typu należy ją uwzględnić w obliczeniach).

3. Przyjęto, iż napięcie początkowe wyładowania równe jest napięciu przeskoku świecy.
4. 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 rysunku 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy układu zapłonowego bezrozdzielaczowego 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_{15} - rezystancja świecy podczas wyładowania, C_2 - pojemność własna cewki, C_{45} - pojemność własna świecy, blok sterowania - parametryczny lub generacyjny.

Fig. 4. Substitute scheme of ignition system. U_b - battery voltage, R_1 - resistance of primal circuit and primal coil, L_1 - induction of primal coil, L_2 - induction of secondary coil, M - mutual inductance, R_4 - coil resistance, R_3 - resistance to limit distortions (to $5k\Omega$), R_{45} - resistance of spark plug, R_{15} - resistance of spark plug during discharge, C_2 - coil capacity, C_{45} - spark plug capacity, - control unit.

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:

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

$$u_{C_{45}}(0^+) = 0, \quad \frac{du_{C_{45}}(0^+)}{dt} = 0, \quad \frac{d^2 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^2} = 0$$

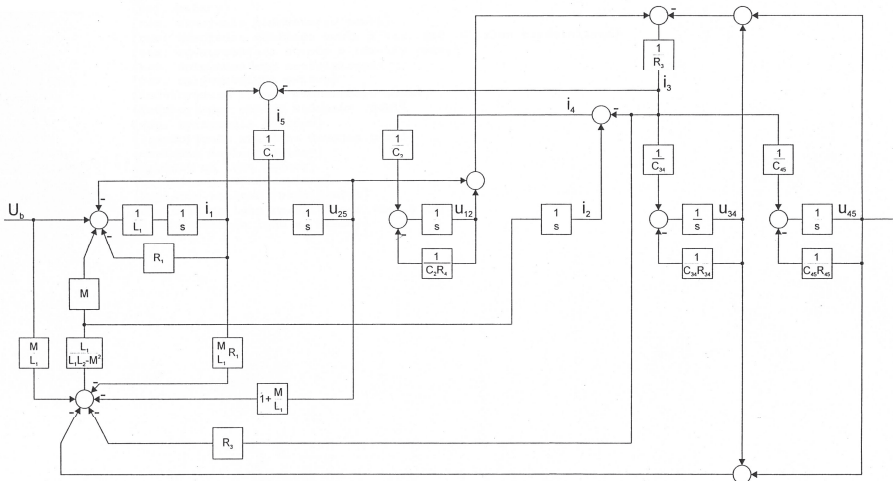
$$\frac{d^3 u_{C_{45}}(0^+)}{dt^3} = -\frac{U_b M}{R_3 C_{45} C_2 (L_1 L_2 - M^2)} = 1,4 \cdot 10^{18} \tag{5}$$

Podstawiając warunki początkowe do równania charakterystycznego otrzymano zależność napięcia na świecy zapłonowej:

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

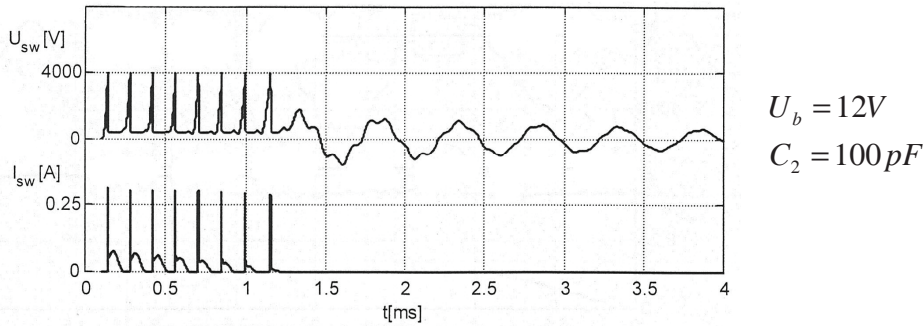
4. Przebiegi symulacji komputerowych

Równania (1)÷(6) opisują model matematyczny układu zapłonowego. Opracowany model został zrealizowany cyfrowo w programach komputerowych. Schemat operatorowy układu został przedstawiony na rysunku 5.

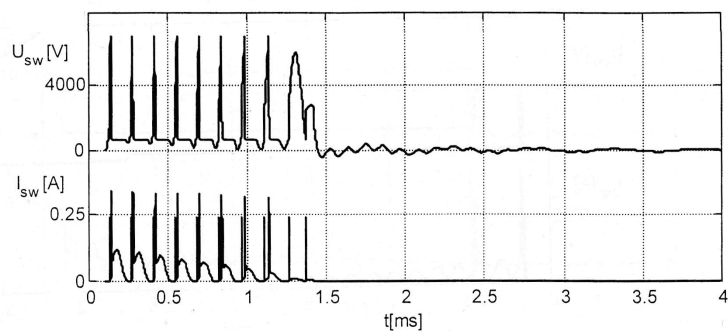


Rys. 5. Schemat operatorowy układu zapłonowego.
Fig. 5. Scheme of the ignition system.

Za pomocą metod symulacji komputerowej wyznaczono przebiegi napięcia na świecy oraz prąd wyładowania iskrowego. Przedstawiono je na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia wyładowania iskrowego na świecy zapłonowej dla napięcia $U_b=9V$.
Fig. 6. Current and voltage of discharge on spark plug ($U_b=9V$).



$$U_b = 12V$$

$$C_2 = 1000pF$$

Rys. 7. Przebiegi prądu i napięcia wyładowania iskrowego na świecy zapłonowej dla napięcia $U_b=12V$.
Fig. 7. Current and voltage of discharge on spark plug ($U_b=12V$).

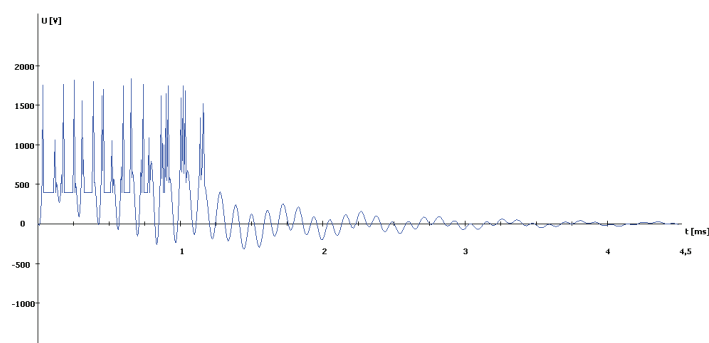
Symulacje dokonane za pomocą programu zaimplementowanego w środowisku Delphi zostały przedstawione na rysunkach 8 ÷ 10.

Dane			
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	6400 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

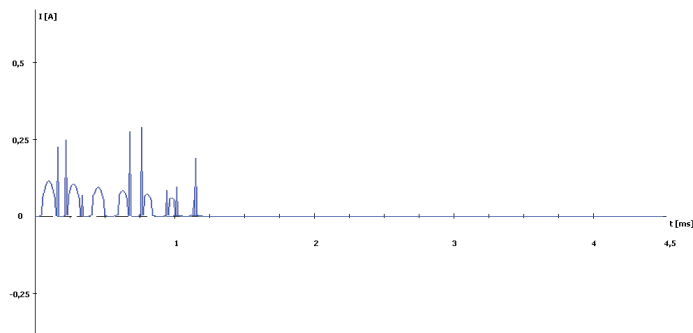
Default OK

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

Fig. 8. Parameters of the ignition system used in application programmed in Delphi.



Rys. 9. Przebieg napięcia na świecy zapłonowej.
Fig. 9. Voltage on the spark plug.

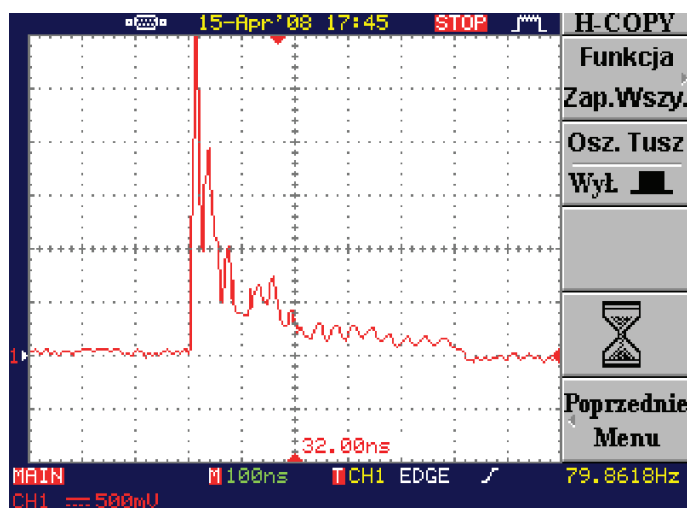


Rys. 10. Przebieg prądu wyladowania iskrowego.
Fig. 10. Current of discharge.

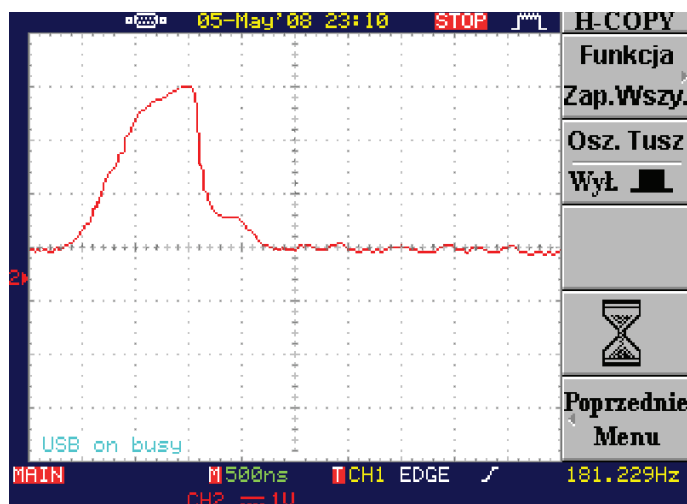
5. Weryfikacja opracowanego modelu

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym w Laboratorium Urządzeń Elektrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Do badań wykorzystano cewkę zapłonową wraz z modułem zapłonowym do Fiata Uno.

Przebiegi zaobserwowane w badaniach eksperymentalnych zostały przedstawione na rysunkach 11÷13.



Rys. 11. Przebieg prądu wyladowania iskrowego.
Fig. 11. Current of discharge.



Rys. 12. Przebieg napięcia na świecy zapłonowej.
Fig. 12. Voltage of on the spark plug.



Rys. 13. Zmierzony przebieg prądu i napięcia na świecy zapłonowej.
Fig. 13. Current and voltage on the spark plug.

6. Wnioski

Badania eksperymentalne potwierdziły przydatność przyjętego modelu matematycznego. Świadczą o tym niewielkie rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji komputerowych a otrzymanymi na stanowisku badawczym oscylogramami. Różnice

wynikają głównie z przyjętych założeń upraszczających dotyczących charakteru niektórych elementów obwodu. Otrzymane na stanowisku badawczym oscylogramy nie zawierają wszystkich „szpilek” przedstawionych w wynikach symulacji komputerowych. Spowodowane jest to różnicą pomiędzy czasem narastania wartości prądowej (rzędu kilku mikrosekund) a czasem wyładowania łukowego oraz wytlumienia – rzędu kilku milisekund.

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.

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

Literatura

- [1] GAD S.: *Metody diagnozowania samochodowych urządzeń elektrycznych* – Materiały sympozjum naukowego „Współczesne urządzenia elektromechatroniki pojazdów samochodowych. Warszawa 2004.
- [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 Science XV Vol. III. Wrocław 2004.
- [3] GAD S., YASTRIEBOV 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] OCIOŚYŃSKI J.: *Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych*. WSP, Warszawa 1998.
- [8] GRANOWSKI W. L.: *Elektriczeskij tok w gazie*. “Nauka”, Moskwa 1991.

Computer methods used to define parameters of the ignition system

S u m m a r y

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 to select 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.