

Sebastian RÓŻOWICZ¹

ANALIZA WPŁYWU ZMIANY NAPIĘCIA AKUMULATORA NA WARTOŚĆ WYŁADOWANIA ISKROWEGO

W artykule przedstawiono model matematyczny baterijnego układu zapłonowego współpracującego z silnikami spalinowymi. Zbudowany model wykorzystano do analizy wpływu zmiany parametrów napięcia zasilania akumulatora na wartości wyładowania iskrowego. Do opracowania modelu matematycznego wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych oraz eksploatacyjnych (na obiekcie rzeczywistym) elementów składowych układu zapłonowego. Badania eksperymentalne przeprowadzono na różnych typach bateryjnych układów zapłonowych. Komputerową analizę układu przeprowadzono na podstawie zbudowanego schematu operatorowego zaimplementowanego w środowisku Delphi. Dokonano porównania i weryfikacji wyników zdjętych z obiektów rzeczywistych z wynikami otrzymanymi z symulacji komputerowych.

INFLUENCE OF BATTERY VOLTAGE CHANGES ON VALUE OF SPARK DISCHARGE ENERGY

Mathematical model of a battery ignition system co-operating with combustion engines has been presented in the paper. The proposed model has been used for analysis of influence of battery voltage changes on value of spark discharge energy. 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. Experimental verification is made using several types of battery ignition systems. Comparison and verification of real object results together with computer simulation results is showed.

1. WPROWADZENIE

Pojazd samochodowy napędzany silnikiem spalinowym od ponad stu lat towarzyszy rozwojowi ludzkości. W tym okresie stał się on podstawowym środkiem transportu i komunikacji, bez którego trudno sobie wyobrazić istnienie nawet bardzo prymitywnego społeczeństwa. Obecnie potrzeby społeczeństwa związane z motoryzacją można podzielić

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

na trzy grupy: środowisko i energia, bezpieczeństwo oraz stosowanie technologii usprawniających prowadzenie samochodu.

Ciągły rozwój przemysłu motoryzacyjnego wymusił wiele zmian w konstrukcji, technologii i eksploatacji urządzeń wchodzących w skład pojazdów, zwłaszcza w zakresie wyposażenia elektrycznego i elektronicznego.

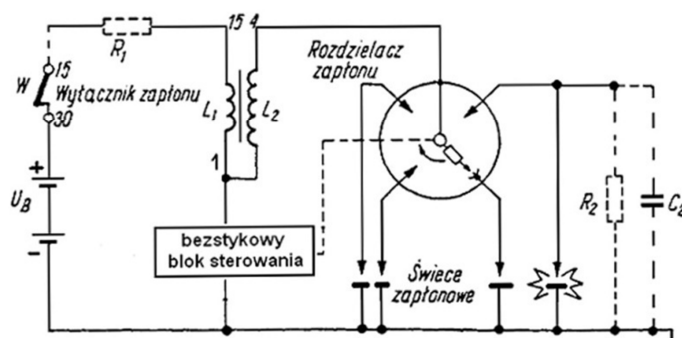
Największe efekty w zakresie ekonomiki i ekologii uzyskujemy poprzez usprawnienie funkcji przerywacza i bloku sterowania zapłonu z urządzeniami regulującymi kąt wyprzedzenia zapłonu.

Badania prowadzone w wielu ośrodkach na świecie 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.

W referacie przedstawiono metodę symulacyjnej analizy 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 rys.2.1 [4].



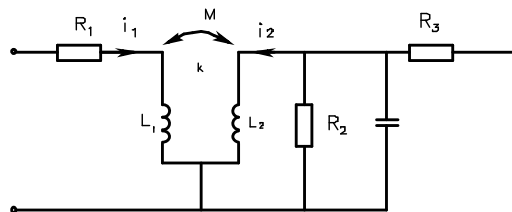
Rys.2.1. Schemat ideowy układu zapłonowego, U_b - napięcie akumulatora, W - wyłącznik zapłonu, R_1 - rezystancja przewodów obwodu pierwotnego i uzwojenia pierwotnego cewki, L_1 - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki, L_2 - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki, C_2 - pojemność własna obwodu wtórnego 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:

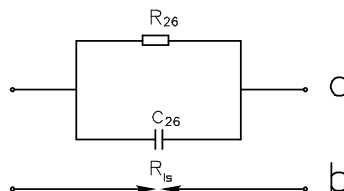
- zastąpiono układ o stałych rozłożonych układem zastępczym o stałych skupionych,
- przyjęto schematy zastępcze cewki zapłonowej oraz świecy zapłonowej,
- przyjęto, że napięcie początkowe wyładowania jest równe napięciu przeskoku na świecy.

Na podstawie wstępnych badań ustalono, że najbardziej odpowiedni jest schemat zastępczy cewki zapłonowej w układzie jak na (rys.2.2.) [6].



Rys.2.2. 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 przeciwwzakłóceniovym 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.2.3.) [6].



Rys.2.3 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.

Dla fazy wzrostu napięcia przyłożonego do świecy zapłonowej przyjęto schemat zastępczy przedstawiony na (rys.2.3. „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.2.3. „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 przeciwzakłóceń (rezystancje przewodów wysokiego napięcia możemy pominąć dla układów zapłonowych klasycznych, a dla układów zapłonowych nowego typu należy ją uwzględnić w obliczeniach),

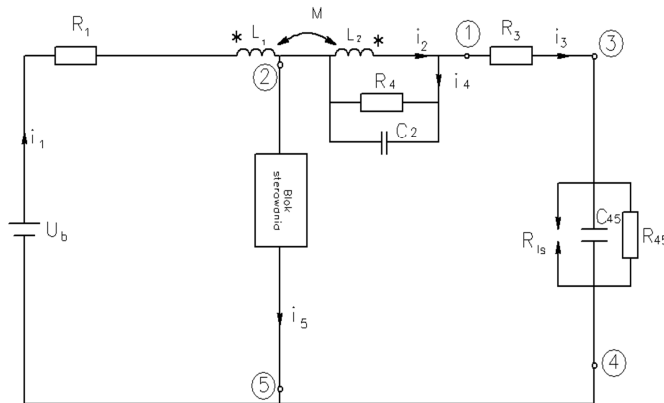
- przyjęto, iż napięcie początkowe wyładowania równa się napięciu przeskoку świecy,

- czas trwania wyładowania uzależniony jest od energii zgromadzonej w cewce.

Wyładowanie między elektrodami świecy uzależnione jest od wartości napięcia przeskoку, 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.3.1.).



Rys.3.1. 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_{1s} - rezystancja świecy podczas wyładowania, C_2 - pojemność własna cewki, C_{45} - pojemność własna świecy, blok sterowania – parametryczny lub generacyjny.

Układ zapłonowy opisano następującymi równaniami:

$$\begin{aligned}
 i_2 &= i_{R2} + i_{C2} + i_3 & i_{C45} &= C_{45} \frac{du_{C45}}{dt} \\
 i_{C2} &= C_2 \frac{du_{C2}}{dt} & i_3 &= i_{C45} + i_{R45} \\
 u_{C2} &= u_{L2} = R_2 i_{R2} = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} & U_b - R_1 \cdot i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= 0 \\
 R_{45} \cdot i_{R45} &= u_{C45} & u_{C2} + R_3 \cdot i_3 + u_{C45} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Rozwiązaniem powyższych równań jest równanie charakterystyczne:

$$\begin{aligned}
 A \cdot \frac{d^4 u_{C45}}{dt^4} + B \cdot \frac{d^3 u_{C45}}{dt^3} + C \cdot \frac{d^2 u_{C45}}{dt^2} + D \cdot \frac{du_{C45}}{dt} + E \cdot u_{C45} &= 0 \\
 A \cdot p^4 + B \cdot p^3 + C \cdot p^2 + D \cdot p + E &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

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:

$$u_{C45}(0^+), \frac{du_{C45}(0^+)}{dt}, \frac{d^2 u_{C45}(0^+)}{dt^2}, \frac{d^3 u_{C45}(0^+)}{dt^3} \tag{4}$$

$$u_{C45}(0^+) = 0, \quad \frac{du_{C45}(0^+)}{dt} = 0, \quad \frac{d^2 u_{C45}(0^+)}{dt^2} = 0$$

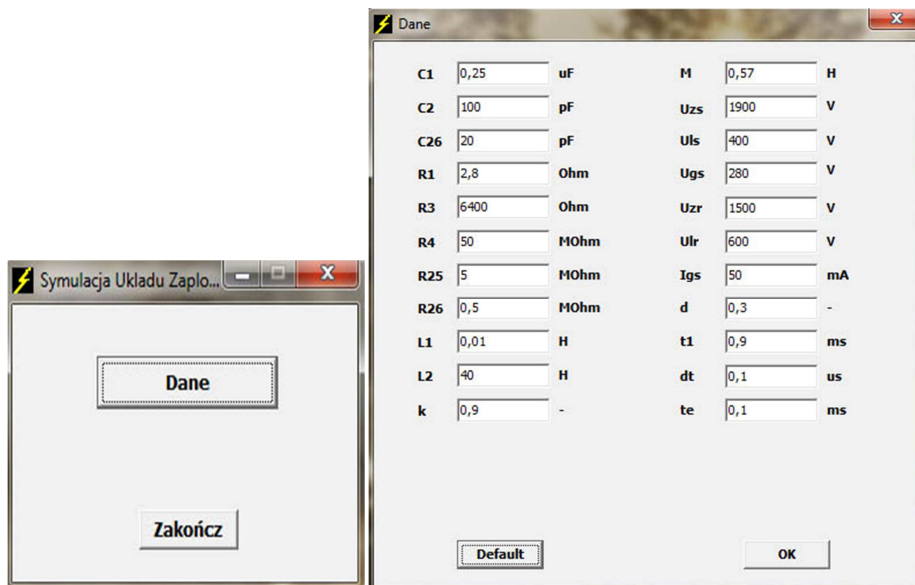
$$\frac{d^3 u_{C45}(0^+)}{dt^3} = -\frac{U_b M}{R_3 C_{45} C_2 (L_1 L_2 - M^2)} = 1,4 \cdot 10^{18} \tag{5}$$

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

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

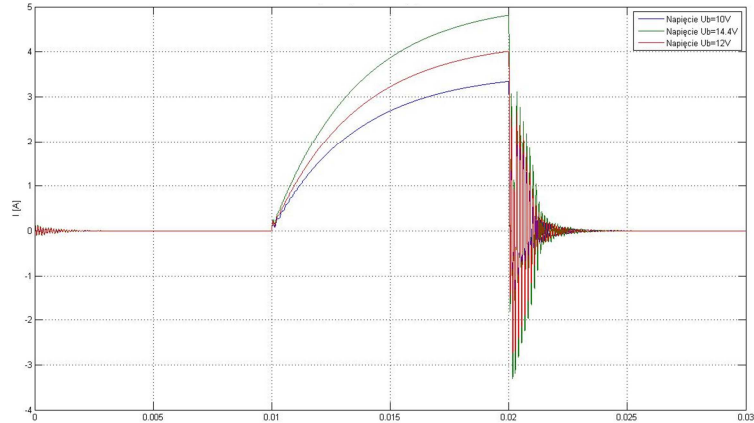
4. PRZEBIEGI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Równania (1)-(6) opisują model matematyczny układu zapłonowego. Opracowany model został zrealizowany cyfrowo w programie komputerowym Delphi.

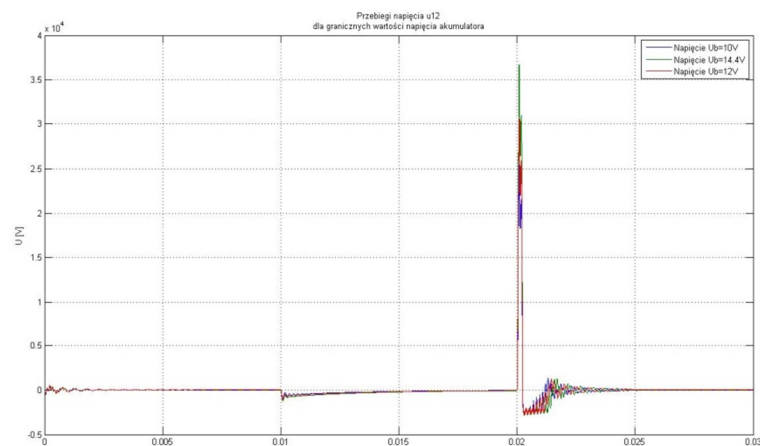


Rys.4.1. Parametry układu zapłonowego wykorzystane w programie zaimplementowanym w środowisku Delphi.

Bardzo duży wpływ na zmianę energii wyładowania iskrowego ma wartość napięcia akumulatora. Analizując przebiegi poszczególnych wartości prądów i napięć w obwodzie układu zapłonowego można jednoznacznie stwierdzić, iż największy wpływ na energię wyładowania iskrowego ma zmiana prądu strony pierwotnej i_1 . Wartości pozostałych mierzonych wielkości i_2 , i_3 , u_{12} oraz u_{45} zmieniają się w przedziałach w znacznie mniejszych przedziałach, nie wpływają znacząco na energię całego cyklu wyładowania iskrowego. Wartość obniżonego napięcia $U_b=10V$ powoduje zmniejszenie energii całego cyklu wyładowania o 14,5%. Natomiast wzrost napięcia do 14,4V zwiększa energię całego cyklu wyładowania o 21,1%. Analiza wpływu wartości napięcia na zaciskach baterii akumulatora na wartość energii wyładowania iskrowego przedstawiono poniżej:



Rys.4.2. Przebiegi prądu i_1 dla granicznych wartości napięcia na zaciskach akumulatora



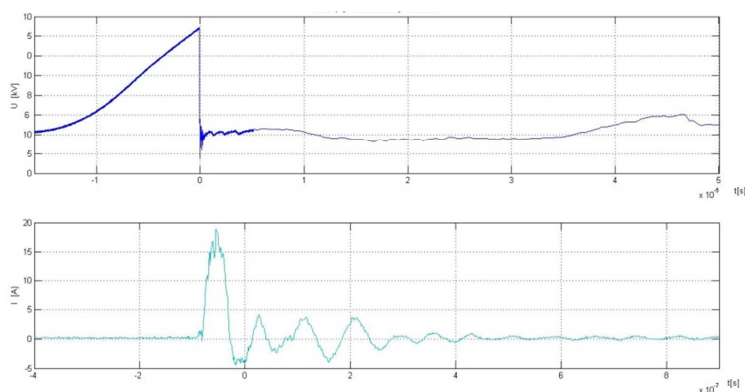
Rys.4.3. Przebiegi napięcia u_{12} dla granicznych wartości napięcia na zaciskach akumulatora

Przy wartości napięcia akumulatora $U_b = 10$ V napięcie na cewce zapłonowej osiąga wartość 21 kV natomiast przy $U_b = 14,4$ V napięcie $u_{12} = 36,5$ kV. Dla klasycznego układu napięcie na cewce zapłonowej ma wartość $U_{12} = 30,2$ kV. Czasy narastania napięcia dla różnych wartości napięcia akumulatora są w tym przypadku takie same.

Dla przeprowadzonej symulacji czas narastania przy różnych wartościach napięcia na akumulatorze nie zmienia się i trwa 0,01 ms. Dla napięcia $U_b = 10$ V, prąd i_1 osiąga wartość 3,2 A czego konsekwencją jest zmniejszenie wartości energii wyładowania iskrowego dla fazy indukcyjnej o 13% w stosunku do klasycznego układu zasilanego napięciem 12 V. Natomiast zwiększenie wartości napięcia U_b do 14,4 V skutkuje wzrostem energii wyładowania dla tej fazy o 19,4%.

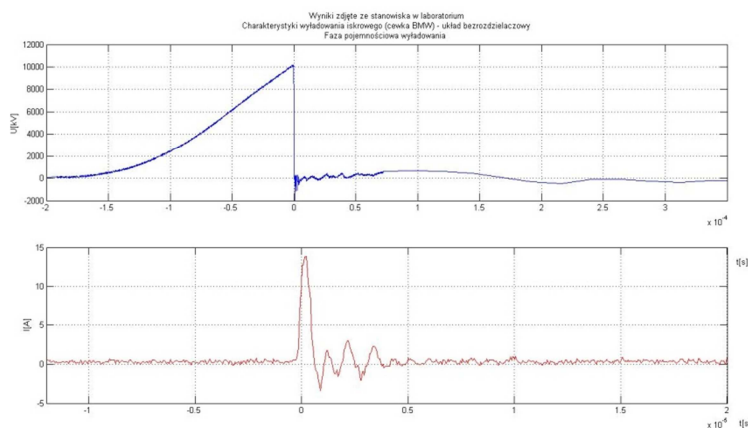
5. WERYFIKACJA PRZYJĘTEGO MODELU MATEMATYCZNEGO

Napięcie zapłonu osiąga wartość $U=8,45\text{kV}$, natomiast prąd strony pierwotnej $I=1,7\text{A}$. Znacznie mniejsza wartość prądu wynika z innego środowiska pracy świecy zapłonowej, wpływ warunków otoczenia (ciśnienie, wilgotność i brak materiału zapalnego). Czas pojedynczego wyładowania iskrowego jest równy $t=2,6\text{ms}$. Wartość napięcia w fazie pojemnościowej narasta liniowo w czasie $16\mu\text{s}$ do napięcia przeskoku $8,45\text{kV}$. Po przełączeniu bloku sterowania w stan rozwartry wartość prądu narasta w czasie $0,1\mu\text{s}$.



Rys. 5.1. Wykresy prądu i napięcia dla napięcia akumulatora 14,4V (obiekt rzeczywisty).

Napięcie zapłonu osiąga wartość $U=7,1\text{kV}$, natomiast prąd strony pierwotnej $I=18,4\text{A}$. Czas pojedynczego wyładowania iskrowego jest równy $t=1,2\text{ms}$. Wartość napięcia w fazie pojemnościowej narasta liniowo w czasie $21\mu\text{s}$ do napięcia przeskoku $7,1\text{kV}$. Po przełączeniu bloku sterowania w stan rozwartry wartość prądu narasta w czasie $0,11\mu\text{s}$.



Rys. 5.2. Wykresy prądu i napięcia dla napięcia akumulatora 10V (obiekt rzeczywisty).

Napięcie zapłonu osiąga wartość $U=10,1\text{kV}$, natomiast prąd strony pierwotnej $I=14\text{A}$. Znacznie mniejsza wartość prądu wynika z innego środowiska pracy świecy zapłonowej i wpływ warunków otoczenia. Czas pojedynczego wyładowania iskrowego jest równy $t=1,2\text{ms}$. Wartość napięcia w fazie pojemnościowej narasta liniowo w czasie $21\mu\text{s}$ do napięcia przeskoku $10,1\text{kV}$. Po przełączeniu bloku sterowania w stan rozarty wartość prądu narasta w czasie $0,06\mu\text{s}$.

6. WNIOSKI

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

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 stanowią cenne źródło informacji o obiektach technicznych.

7. 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 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] Ocioszyński J.: *Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych*. WSP Warszawa 1998.
- [8] Granowski W. L.: *Elektricheskij tok w gazie*. “Nauka” Moskwa 1991.