

## Analiza wpływu zmiany parametrów R,L,C strony pierwotnej układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę wpływu zmiany parametrów strony pierwotnej układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego. Przeprowadzono również analizę zakresu zmian wartości energii wyładowania iskrowego dla zmiennych wartości wszystkich elementów strony pierwotnej układu. Badania symulacyjne przeprowadzono w autorskim programie opracowanym w środowisku Matlab-Simulink, a zweryfikowano je eksperymentalnie na stanowisku badawczym bateryjnych układów zapłonowych. (The effect of parameter change of ignition system primary side R, L and C elements on the value of spark discharge energy.)

**Abstract:** The paper discusses how the parameter change of the primary side of the ignition system affects the value of spark discharge energy. The extent of changes in spark discharge energy values for changing values of all elements of the primary system is analyzed. Simulation studies are carried out in the program, developed by the authors in Matlab - Simulink and verified experimentally on a test stand for battery ignition systems.

**Słowa kluczowe:** układy zapłonowe, układ nieliniowy, wyładowanie iskrowe, energia.

**Keywords:** ignition systems, nonlinear system, spark discharge, energy.

### Wstęp

Prawidłowe działanie silnika spalinowego uzależnione jest od wielu czynników, między innymi od pracy układu zapłonowego. Energia wyładowania iskrowego w sposób istotny wpływa na proces spalania w silniku a w konsekwencji na moc, moment obrotowy, zużycie paliwa i toksyczność spalin.

Układ zapłonowy silnika spalinowego ma za zadanie zapoczątkować proces spalania mieszanki paliwowo powietrznej przez wyładowanie elektryczne między elektrodami świecy zapłonowej. Proces wyładowania następuje, gdy napięcie przyłożone do elektrod świecy zapłonowej spowoduje jonizację gazu w stopniu umożliwiającym przepływ prądu elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Obecnie w nowo produkowanych pojazdach samochodowych stosuje się układy zapłonowe bezrozdzielaczowe. Takie rozwiązania konstrukcyjne układów zapłonowych są prawie zawsze częścią systemu sterowania silnikiem. Ponadto dość powszechnie wykorzystywane są indywidualne cewki indukcyjne z oddzielnymi układami dla każdego cylindra (świecy zapłonowej). W takim przypadku w układzie zapłonowym nie występują przewody zapłonowe wysokiego napięcia. Stosunkowo rzadko stosowane są dziś wysokonapięciowe pojemnościowe układy zapłonowe, zaś w małych silnikach układy iskrownikowe i autonomiczne układy zapłonowe z wykorzystaniem cewki zapłonowej i rozdzielacza wysokiego napięcia [3]. Takie układy dominują jednak w milionach samochodów starszych generacji, które jeszcze długo będą poruszały się po naszych drogach.

W silnikach o parzystej liczbie cylindrów w bezrozdzielaczowych układach zapłonowych dla ograniczenia ilości urządzeń sterujących stosowane są cewki dwuuzwojeniowe. Każda z cewek wraz z końcówką mocy przyporządkowana jest tej parze cylindrów, której tłoki poruszają się w tym samym kierunku. Dla silnika czterocylindrowego oznacza to, że przeskok iskry na świecach występuje naprzemian, odpowiednio w parach cylindrów 1/4 oraz 3/2.

Ocenia się, że energia iskry w cylindrze, w którym trwa sprężanie wynosi 70% energii generowanej przez cewkę, natomiast w cylindrze, w którym tłok znajduje się w suwie wylotu energia wyładowania stanowi 30% całkowitej energii wytworzonej przez cewkę zapłonową. Rozdział energii związany jest bezpośrednio z ciśnieniami panującymi w tych cylindrach [1-2]. Prowadzone w wielu ośrodkach naukowo-badawczych badania nad topologią układów

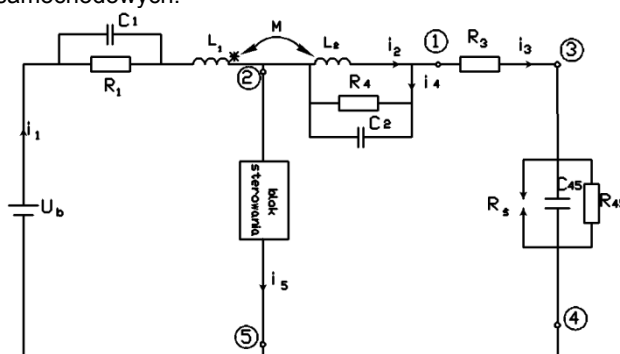
zapłonowych doprowadziły do powstania wielu nowych rozwiązań układów zapłonowych, w których wykorzystuje się elementy elektroniczne, jak również sterowniki jako centralne jednostki komputerowe nadzorujące i sterujące procesem spalania mieszanki paliwowo powietrznej [13-16].

Niniejsza praca jest kontynuacją prac [4, 5], które miały na celu badania parametrów wyładowania iskrowego, dla uzyskania założonych efektów pracy silnika. Uzyskane wyniki pozwalają ocenić jakość wyładowania iskrowego w funkcji konfiguracji i parametrów układu zapłonowego.

Jak pokazano w pracach [8,11,13] parametry R, L i C (tak strony pierwotnej, jak i strony wtórnej) w sposób istotny wpływają na pracę układu zapłonowego. Opisowi wpływu tych parametrów strony pierwotnej układu na wartość energii wyładowania iskrowego poświęcone jest w pewnym zakresie niniejsze opracowanie.

### Model układu zapłonowego

Energia wyładowania iskrowego jest zależna od wielu czynników, między innymi od parametrów obwodu pierwotnego układu zapłonowego. Na rysunku 1 przedstawiono model bezrozdzielaczowego bezstykowego układu zapłonowego stosowany w pojazdach samochodowych.



Rys. 1. Model bezrozdzielaczowego bezstykowego układu zapłonowego:  $U_b$  - napięcie akumulatora,  $R_1$  - rezystancja uzwojenia pierwotnego cewki,  $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki,  $C_1$  - pojemność strony pierwotnej układu,  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki,  $R_4$  - rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu cewki,  $R_3$  - ograniczenie zakłóceń radioelektrycznych,  $R_{45}$  - rezystancja upływnościowa świecy,  $R_s$  - rezystancja świecy podczas wyładowania,  $C_2$  - pojemność własna cewki,  $C_{45}$  - pojemność własna świecy, Blok sterowania - parametryczny lub generacyjny.

Parametry obwodu pierwotnego mające wpływ na wartość energii wyładowania iskrowego to: napięcie akumulatora  $U_b$ , rezystancję  $R_1$ , pojemność  $C_1$ , indukcyjność  $L_1$  oraz współczynnik sprzężenia  $M$ .

Przyjmując jako zmienne stanu:  $x_1 = i_1$ ,  $x_2 = i_2$ ,  $x_3 = u_{C2}$ ,  $x_4 = u_{C45}$ , równanie stanu, opisujące model bezrozdzielaczowego bezstykowego układu zapłonowego (rys. 1), ma następującą postać:

$$(1) \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}$$

gdzie:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 & E_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & E_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_B \\ U_B \\ U_B \\ U_B \end{bmatrix}$$

Współczynniki występujące w macierzach  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$  dane są zależnościami:

$$A_1 = \frac{R_1}{\left(\frac{M^2}{L_2} - L_1\right)}, \quad B_1 = \frac{MR_2}{L_2\left(\frac{M^2}{L_2} - L_1\right)}, \quad C_1 = -\frac{M}{L_2\left(\frac{M^2}{L_2} - L_1\right)},$$

$$D_1 = -\frac{1}{\left(\frac{M^2}{L_2} - L_1\right)}, \quad A_2 = \frac{-MR_1}{L_1\left(L_2 - \frac{M^2}{L_1}\right)}, \quad B_2 = \frac{-R_2}{\left(L_2 - \frac{M^2}{L_1}\right)},$$

$$C_2 = \frac{1}{\left(L_2 - \frac{M^2}{L_1}\right)}, \quad D_2 = \frac{M}{L_1\left(L_2 - \frac{M^2}{L_1}\right)}, \quad A_3 = \frac{C_{45}A_4}{C_2},$$

$$B_3 = \left(\frac{C_{45}B_4}{C_2} - \frac{1}{C_2}\right), \quad C_3 = \left(\frac{C_{45}C_4}{C_2} - \frac{1}{C_2}\right), \quad D_3 = \frac{C_{45}}{C_2}D_4U_B,$$

$$E_3 = \left(\frac{1}{C_2R_{45}} + \frac{C_{45}E_4}{C_2}\right), \quad A_4 = \left(\frac{MA_1}{2R_3C_{45}} - \frac{L_2A_2}{2R_3C_{45}}\right),$$

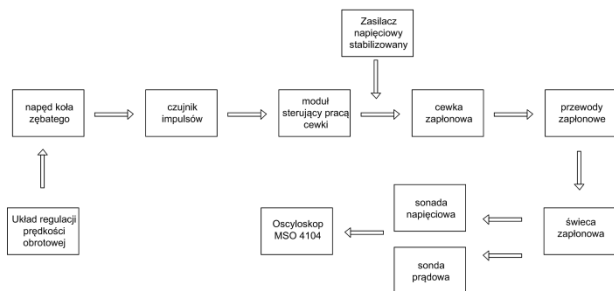
$$B_4 = \left(\frac{MB_1}{2R_3C_{45}} - \frac{L_2B_2}{2R_3C_{45}} + \frac{R_2}{2R_3C_{45}}\right), \quad C_4 = \left(\frac{MC_1}{2R_3C_{45}} - \frac{L_2C_2}{2R_3C_{45}}\right)$$

$$D_4 = \frac{-L_2D_2}{2R_3C_{45}}, \quad E_4 = \left(\frac{R_3}{2R_3C_{45}R_{45}} + \frac{1}{2R_3C_{45}}\right)$$

### Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, w którym obiektem badań był samochodowy moduł zapłonowy firmy MAGNETI MARELLI typ: BKL4A współpracujący z cewką zapłonową Blazet typ: CZ-601. Stanowisko pozwala dokonać pomiaru prądu i napięcia w czasie wyładowania na świecy zapłonowej pojazdu samochodowego. Może być podzielone na dwa moduły: pierwszy odpowiedzialny jest za napęd układu, a drugi za wytworzenie i pomiar wartości wyładowania iskrowego na świecy zapłonowej samochodu.

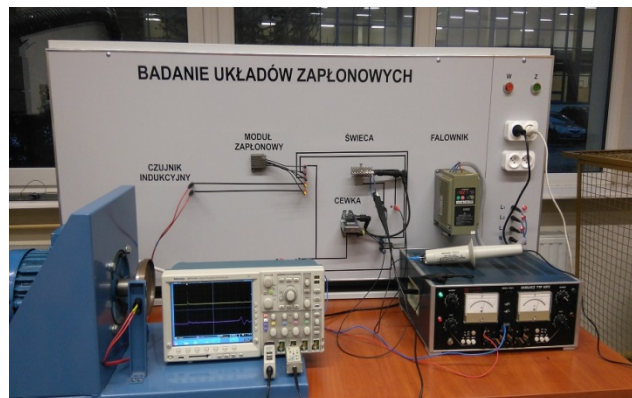
Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat blokowy stanowiska a fotografię pokazującą kompletne stanowisko (wraz z wyposażeniem pomiarowym) pokazano na rys. 3.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska do badania układów zapłonowych.

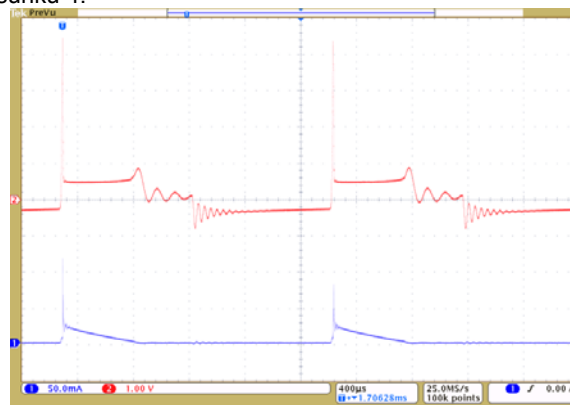
Główne elementy stanowiska laboratoryjnego to:

- falownik HITACHI X200, który został zaprogramowany na zakres płynnej regulacji częstotliwości 0÷200Hz,
- silnik indukcyjny o mocy 2,2kW i prędkości obrotowej znamionowej 1420obr/min.do napędu tarczy na wle,
- czujnik indukcyjny prędkości obrotowej wału silnika pochodzący z samochodu Fiat Uno 1.0,
- moduł zapłonowy samochodowy (sterujący pracą cewki zapłonowej) firmy MAGNETI MARELLI - BKL4A,
- cewka zapłonowa samochodowa Blazet CZ-601,
- sonda napięciowa firmy TEKTRONIX typ P6015A 1000X High Voltage Probe,
- przetwornica prądu na napięcie CWT 015B Ultra Mini-ROGOWSKI CURRENT TRANSDUCER,
- oscyloskop cyfrowy Tektronix DPO 4104,
- świeca zapłonowa samochodowa NGK,
- przewód wysokiego napięcia łączący cewkę zapłonową ze świecą zapłonową,
- zasilacz Unitar TYP5372.



Rys. 3. Widok stanowiska laboratoryjnego do badania układów zapłonowych.

W wyniku prowadzonych eksperymentów otrzymano przebiegi wartości prądu i napięcia, które przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przebiegi prądu i napięcia.

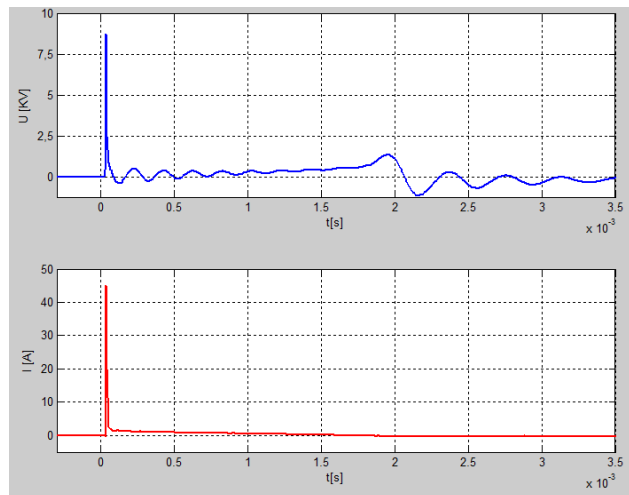
Analizując otrzymane przebiegi (rys. 4), można zauważyć czas że wyładowania iskrowego trwa 2,6ms, natomiast faza narastania wartości prądowej to 16 µs. Wartość napięcia w fazie pojemnościowej narasta liniowo w czasie 16µs do napięcia przeskoku 9,45kV. Po przełączeniu bloku sterowania w stan rozarty wartość prądu narasta w czasie 0,12µs. Obliczona energia wyładowania iskrowego dla badanego układu wynosi 23,41mJ.

## Symulacje cyfrowe z wykorzystaniem modelu układu zapłonowego

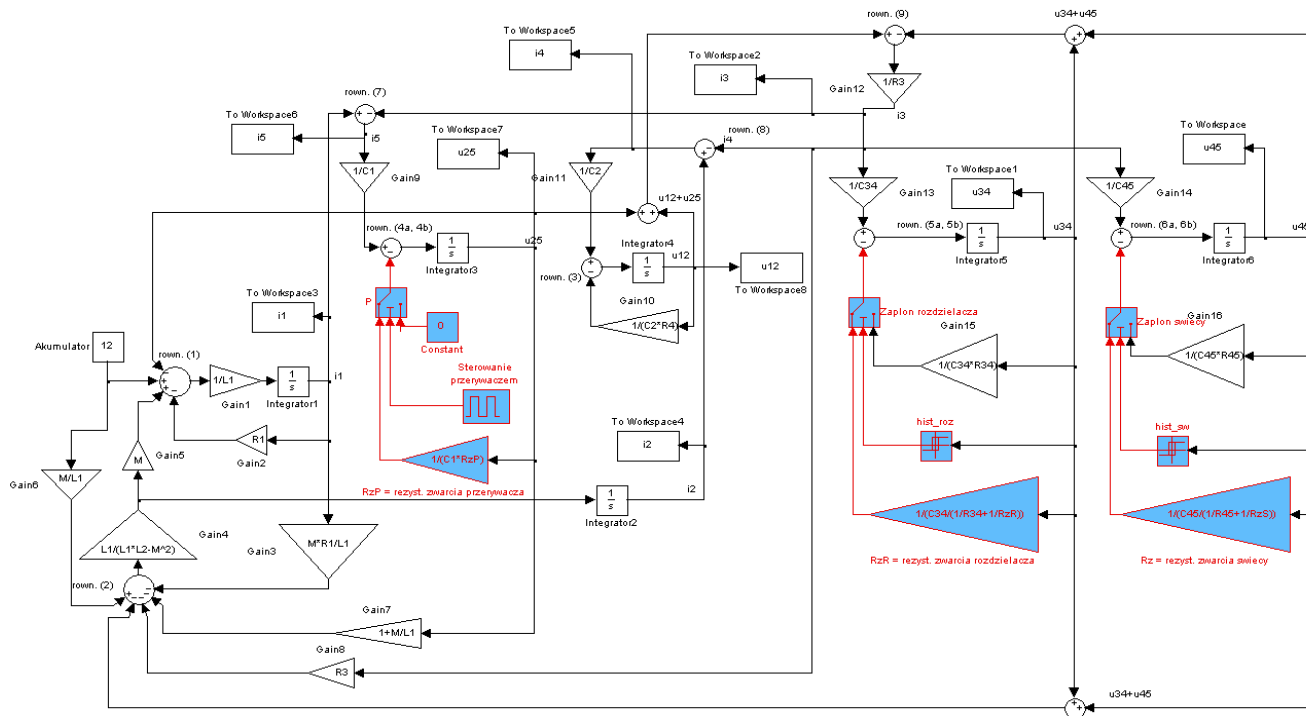
W celu zbadania wpływu parametrów RLC strony pierwotnej układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego opracowano model cyfrowy układu zapłonowego. Powstał on na podstawie układu równań (1), a jego schemat operacyjny przedstawiono na rysunku 5. Model opracowano w programie Matlab Simulink. W schemacie operacyjnym przełączniki (Switch) zostały użyte w celu symulowania wyładowań na świecy.

Dla określenia zgodności opracowanego modelu dokonano weryfikacji otrzymanych wyników (symulacji cyfrowych przedstawionych na rys. 6 i 7) z wynikami z wynikami otrzymanymi na stanowisku badawczym (rys. 4). Okazało się, że model cyfrowy w sposób zadowalający symuluje rzeczywiste przebiegi prądów i napięć w badanym układzie zapłonowym. Również w tym przypadku energia wyładowania iskrowego (dla symulacji cyfrowej) wyniosła 23,40 mJ.

Zasadniczym celem eksperymentów numerycznych było zbadanie wpływu zmian parametrów  $L_1, C_1$  oraz  $R_1$  obwodu pierwotnego na wartość energii wyładowania iskrowego.



Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia układu zapłonowego - badania symulacyjne.



Rys.5. Schemat operacyjny układu zapłonowego do realizacji wyładowania iskrowego w Matlab Simulink.

Zakres zmienności poszczególnych wartości parametrów układu zapłonowego strony pierwotnej dobrano tak aby pokrywał wielkości stosowane w różnych typach układów zapłonowych. Parametry zmieniano w następującym zakresie (z określonym krokiem):

- $C_1 = 0,1 \mu\text{F} \div 0,25 \mu\text{F}$ , z krokiem zmian  $0,02 \mu\text{F}$ ;
- $L_1 = (0,01 \div 0,1) \text{H}$ , z krokiem zmian co  $0,01 \text{H}$ ;
- $R_1 = (0,56 \div 2,8) \Omega$ , z krokiem zmian co  $0,25 \Omega$ .

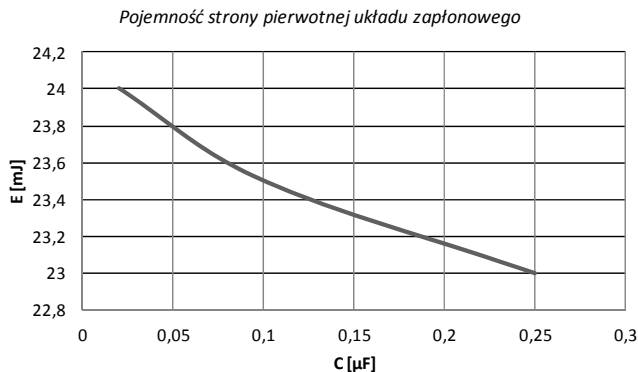
Symulacje numeryczne przeprowadzono zmieniając wybrany parametr a pozostałe zostawiając na niezmiennym poziomie.

Wiadomym jest, iż bardzo istotnym parametrem układu zapłonowego jest jego pojemność, w której gromadzona jest energia potrzebna do wytworzenia iskry za pomocą

cewki zapłonowej. Gwałtowny wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym cewki zapłonowej, a więc i strumienia magnetycznego, powoduje wyindukowanie wysokiego napięcia w uzwojeniu wtórnym i przeskok iskry na elektrodach świecy zapłonowej. Miarą przekazanej do cewki zapłonowej energii jest wartość napięcia, do którego został naładowany kondensator  $C_1$ . Wpływ pojemności  $C_1$  na wartość energii przedstawiono na rysunku 7.

Dla powyższego zakresu zmienności pojemności układu obliczono energię zgromadzoną w cewce zapłonowej oraz energię wyładowania iskrowego. Uzyskane wyniki wskazują, że wpływ pojemności na wartość energii wyładowania iskrowego jest znikomy. Dla zmiany pojemności w zakresie od  $0,1 \text{pF}$  do  $0,03 \mu\text{F}$  przy

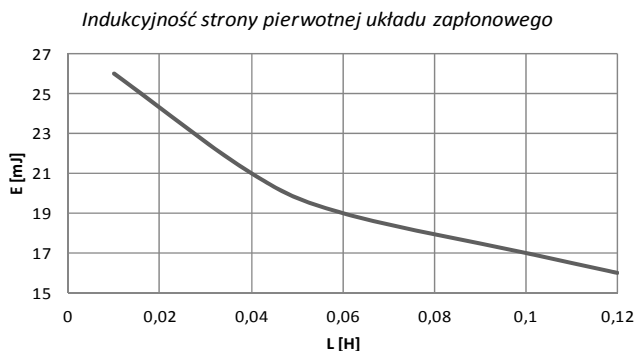
wartościach średnich  $L_1$ ,  $R_1$  z przyjętych zakresów zmienności energia wyładowania zmienia się o 0,07mJ. Należy jednak liczyć się z relacją, iż wzrost pojemności powoduje obniżenie napięcia indukowanego w cewce zapłonowej co może mieć bezpośredni wpływ na pewność i skuteczność wyładowania iskrowego.



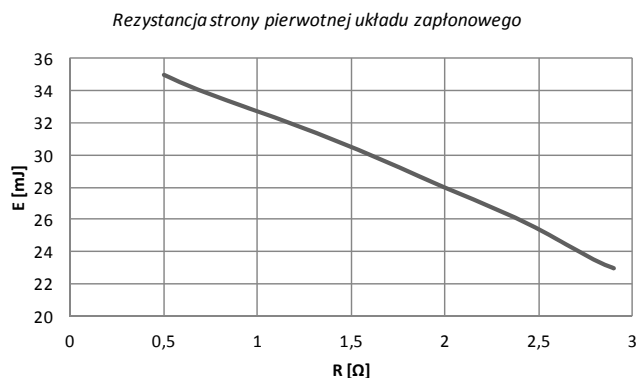
Rys.7. Zmiany wartości energii wyładowania iskrowego w funkcji zmian pojemności strony pierwotnej układu zapłonowego.

W celu sprawdzenia wpływu zmian indukcyjności przeprowadzono symulację której wyniki pokazano na rysunku 8.

Jak wiadomo wzrost prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym cewki zapłonowej oznacza zwiększenie energii iskry w zakresie niskich i średnich prędkości obrotowych. Natomiast wzrost napięcia w zakresie dużych prędkości obrotowych można uzyskać przez zmniejszenie stałej czasowej obwodu pierwotnego, a więc przez zmniejszenie indukcyjności  $L_1$ . Zmiana wartości indukcyjności strony pierwotnej układu zapłonowego w granicach  $(0,01 \div 0,1)H$  skutkuje zmianą energia wyładowania iskrowego w zakresie  $26 \div 15$  mJ. (rys. 8)



Rys.8. Zmiany wartości energii wyładowania iskrowego w funkcji zmian indukcyjności strony pierwotnej układu zapłonowego.



Rys.9. Zmiany wartości energii wyładowania iskrowego w funkcji zmian rezystancji strony pierwotnej układu zapłonowego.

W kolejnym etapie symulacji dla przyjętych średnich wartości  $L_1$ ,  $C_1$  przeprowadzono badania wpływu zmian

rezystancji  $R_1$  w zakresie  $0,56 \div 2,8 \Omega$  na wartość energii wyładowania iskrowego. Wyniki symulacji zaprezentowano na rysunku 9.

Prąd  $i_1$  strony pierwotnej układu zapłonowego dla rezystancji  $R_1 = 2,8 \Omega$  wynosi 9A, natomiast dla rezystancji do  $R_1 = 0,56 \Omega$  wynosi 17,5A przy napięciu zasilania  $U_b = 12V$  oraz przy średnich nie zmienionych pozostałych parametrach strony pierwotnej układu zapłonowego. Energia wyładowania iskrowego zmienia się w granicach  $35 \div 22$  mJ.

### Podsumowanie

Ocenę wpływu zmian wartości poszczególnych parametrów strony pierwotnej układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego dokonano przeprowadzając badania: symulacyjne oraz na obiekcie rzeczywistym.

Wyniki uzyskane z symulacji komputerowej są zbieżne z wynikami otrzymanymi na obiekcie rzeczywistym, co potwierdza poprawność przyjętego modelu matematycznego. Opisane zjawiska zachodzących w obwodzie zapłonowym oraz ich rozwiązanie, zostało zaimplementowane w postaci programu komputerowego, oddającego charakter pracy układu zapłonowego. Opracowany program pozwala analizować wpływ parametrów układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego. Jednocześnie dowodzi przydatności opracowanego modelu matematycznego, który może zostać wykorzystany w pracach nad rozwojem oraz optymalizacją układu zapłonowego.

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań i wyników zamieszczonych w pracy należy zwrócić szczególnie uwagę przy doborze elementów konstrukcyjnych układu zapłonowego na wartość następujących parametrów:

- Zmiana wartości  $R_1$  - rezystancja obwodu pierwotnego - powoduje zmianę energii w bardzo szerokim zakresie. Ograniczenie wartości tej rezystancji do 0,56 powoduje zwiększenie wartości energii o 40%.
- Zmiana wartości  $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej - ma istotny wpływ na stromość narastania napięcia po stronie wtórnej układu zapłonowego. Ma to bezpośredni wpływ na ograniczenie strat przy założonej wartości napięcia przeskoku wynikającej ze wzoru Paschena. Stromość narastania decyduje o czasie trwania prądu upływnościowego. W skrajnym przypadku przy małej rezystancji nagaru strata energii związana jest z prądami upływnościowymi i może uniemożliwić przeskok wyładowania iskrowego.
- zwiększenie pojemności  $C_1$  do  $0,25 \mu F$  powoduje nieznaczny spadek energii wyładowania do poziomu 23 mJ.
- Zmiana wartości  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego cewki zapłonowej - ma również bezpośredni wpływ na wartość energii wyładowania iskrowego.
- Zmiana wartości  $R_3$  - rezystancja przeciwzakłócenia - ogranicza energię wyładowania, natomiast jest konieczna z punktu widzenia ograniczenia zakłóceń radioelektrycznych. Zadawalające efekty przeciwzakłócenia można uzyskać poprzez stosowanie przewodów reaktancyjnych wysokiego napięcia.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że wraz ze zmianą wartości rezystancji strony pierwotnej układu zapłonowego znacznie zmienia się wartość energii wyładowania iskrowego. Zmiana kolejno poszczególnych wartości,  $R_1$ ,  $L_1$  przy nie zmienionym  $C_1$  wpływa znacząco na zmianę wartości energii wyładowania iskrowego.

Reasumując można powiedzieć, że istotny wpływ na wartość energii wyładowania iskrowego rezystancja  $R_1$  oraz  $L_1$ .

**Autor:** dr inż. Sebastian Różowicz, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej i Automatyki, Zakład Energoelektroniki, Maszyn i Napędów Elektrycznych, Aleja. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: [s.rozowicz@tu.kielce.pl](mailto:s.rozowicz@tu.kielce.pl)

#### LITERATURA

- [1] Pomykalski Z.: Elektrotechnika samochodów WKŁ 1978
- [2] Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych, WKŁ 2013.
- [3] Wiak S.: Mechatronika tom II (praca zbiorowa), rozdz.7. Mechatronika pojazdowa., Łódź 2010, ISBN: 978-83-60434-85-7,
- [4] Różowicz S.: Analiza wpływu rozwiązań konstrukcyjnych i parametrów układu zapłonowego na wartość energii wyładowania iskrowego, Rozprawa doktorska, PŚK 2012,
- [5] Różowicz S.: Wpływ wybranych parametrów strony pierwotnej układu zapłonowego na ograniczenie poziomu emisji i toksyczności spalin *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, nr.12, 72-75.
- [6] Konopiński M.: Elektronika w technice motoryzacyjnej WKŁ 1977.
- [7] Herner A., Riehl H.J. Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Warszawa 2003.
- [8] Herner A.: Elektronika w samochodzie, WKŁ, Warszawa 2001.
- [9] Kubiak P., Zalewski M.: Pracownia diagnostyki pojazdów samochodowych WKŁ 2012
- [10] Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych, ITeE, Radom 2002.
- [11] Dziubiński M.: Badania elektronicznych urządzeń pojazdów samochodowych Wydaw. Naukowe Gabriel Borowski 2004.
- [12] Pacholski K.: Elektryczne i elektroniczne wyposażenie pojazdów samochodowych. Część 1. Wyposażenie elektryczne i elektromechaniczne, WKŁ 2009.
- [13] Szulborski A.: Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ Warszawa 2004.
- [14] Osamura H. Development of long life and high ignitability iridium spark plug. In: Seoul 2000 FISITA world automotive congress, Paper number F2000A144, Korea; 2000.
- [15] Robinet C, Andrzejewski J, Higelin P. Cycle-to-cycle variation study of an si engine fired by spark plug and a non conventional device. SAE paper 972986; 1997.
- [16] Schneehage G., tłumacz: Trzeciak K.: Czujniki układu sterowania silnika w praktyce warsztatowej, WKŁ 2012.
- [17] Stone C, Brown A, Beckwith P. Cycle-by-cycle variations in spark ignition engine combustion – part II: modeling of flame kernel displacements as a cause of cycle-by-cycle variations. SAE paper 960613; 1996.