



# POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

## WYDZIAŁ MECHANICZNY

### KATEDRA TRANSPORTU



## Praca doktorska

Wpływ parametrów układu zapłonowego na kształtowanie  
charakterystyki silnika

mgr inż. Mirosław Urbanowicz

Promotor

prof.dr hab.inż.dr h.c. Janusz Mysłowski

Promotor pomocniczy

dr inż. Konrad Zajkowski

Koszalin, październik 2015

## Spis treści:

1. WSTĘP .....	4
1.1. Rozwój układów zapłonowych .....	4
1.2. Cel i hipoteza pracy .....	6
2. BUDOWA I ZASADY DZIAŁANIA BATERYJNEGO UKŁADU ZAPŁONOWEGO....	8
2.1 Przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym .....	8
2.2. Układy zapłonowe gromadzące energię w indukcyjności .....	11
2.3. Budowa i parametry cewek zapłonowych .....	19
2.4. Wpływ parametrów cewki na wartość wysokiego napięcia .....	22
2.5. Metody zmiany indukcyjności i rezystancji cewki .....	27
2.6. Modyfikacje układów zapłonowych opisane w literaturze .....	33
3. ANALIZA STANÓW PRACY UKŁADU ZAPŁONOWEGO.....	41
3.1. Działanie układu w fazie narastania i zaniku prądu pierwotnego .....	41
3.2. Stany nieustalone w obwodzie RLC o wymuszeniu stałym .....	42
3.3. Określenie charakteru obwodu zapłonu .....	45
3.4. Rozładowanie pojemności w obwodzie pierwotnym .....	46
3.5. Ładowanie pojemności w obwodzie pierwotnym .....	47
3.6. Faza zwarcia obwodu pierwotnego .....	47
3.7. Analiza schematów zastępczych układu zapłonowego .....	48
3.8. Przebiegi napięć obwodu zapłonu wykreślone na podstawie równań teoretycznych ..	52
4. KONSTRUKCJA CEWKI Z REGULOWANĄ INDUKCYJNOŚCIĄ.....	55
5. WPŁYW INDUKCYJNOŚCI WŁASNEJ OBWODU PIERWOTNEGO NA PRACĘ UKŁADU .....	57
5.1. Przebieg napięcia pierwotnego $U_p$ i wtórnego $U_s$ dla prędkości $n \sim 930$ obr./min. ....	59
5.2. Przebieg napięcia $U_p$ i $U_s$ dla $n \sim 1550$ obr./min. przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego .....	61
5.3. Przebiegi napięcia $U_p$ i $U_s$ dla $n \sim 3350$ obrotów/minutę przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego .....	63
5.4. Przebiegi napięcia pierwotnego $U_p$ i wtórnego $U_s$ dla $n \sim 4000$ obr./min. przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego .....	66
5.5. Badanie wpływu indukcyjności obwodu pierwotnego na prąd w obwodzie pierwotnym baterijnego układu zapłonowego z zastosowaniem cewki zapłonowej o zmiennej przekładni .....	69

5.6. Wpływ rezonansu napięć na przebieg prądu w obwodzie pierwotnym.....	74
6. WPŁYW POJEMNOŚCI NA PRACĘ UKŁADU ZAPŁONOWEGO .....	76
7. ANALIZA STATYSTYCZNA PRZEBIEGÓW PRĄDU ISKRY .....	83
7.1. Wartość średnia prądu iskry .....	84
7.2. Prąd w obwodzie pierwotnym .....	85
7.3. Analiza statystyczna wyników pomiarów natężenia prądu iskry .....	88
8. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA CEWKI O ZMIENNEJ INDUKCYJNOŚCI W UKŁADACH STEROWANYCH ELEKTRONICZNIE .....	94
8.1. Porównanie działania cewki zapłonowej o zmiennej indukcyjności z cewką stosowaną w elektronicznym układzie zapłonowym .....	94
8.2. Przebiegi prądów pierwotnych .....	106
9. WPŁYW UKŁADU ZAPŁONOWEGO NA CHARAKTERYSTYKĘ SILNIKA.....	110
9.1. Wprowadzenie .....	110
9.2. Obiekt badań .....	113
9.3. Stanowisko badawcze .....	116
9.4. Sposób przeprowadzenia badań.....	118
9.5. Wyniki pomiarów .....	120
9.5.1. Pomiary silnika 1,5 SLE/AA .....	120
9.5.2. Pomiary silnika 1,6 GLI.....	122
9.6. Analiza statystyczna powtarzalności pomiarów .....	129
9.6.1. Błędy pomiarów bezpośrednich na stanowisku hamownianym .....	129
9.6.1.1. Błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika.....	129
9.6.1.2. Błąd pomiaru siły hamulca hydraulicznego.....	130
9.6.2. Błędy pomiarów pośrednich na stanowisku hamownianym.....	132
9.6.2.1. Błąd pomiaru mocy efektywnej.....	132
9.6.2.2. Błąd pomiaru momentu obrotowego.....	134
10. PODSUMOWANIE.....	135
11. WNIOSKI.....	139
LITERATURA.....	139
ZAŁĄCZNIKI : .....	145

# 1. WSTĘP

## 1.1. Rozwój układów zapłonowych

Historia samochodowego silnika benzynowego od początku jego powstania, związana jest z poszukiwaniem skutecznego i niezawodnego sposobu zapłonu mieszaniny palnej: benzyny i powietrza. Już w 1801 roku Philippe d'Humbersin wskazywał na możliwość zastosowania iskry elektrycznej jako impulsu energetycznego inicjującego proces spalania w silniku benzynowym. Po wielu próbach skuteczne rozwiązanie tego problemu przedstawił Robert Bosch. W roku 1886 w samochodach Benza i Daimlera zastosowano układ zapłonowy składający się z ogniwa galwanicznego, induktora iskrowego i świecy zapłonowej. Wynalazek zapłonu iskrowego niezmiennie stosuje się w silniku iskrowym od ponad stu lat. Za jego stosowaniem przemawiają zalety w postaci prostej zasady działania, możliwości wytwarzania dostatecznej energii zapłonu przy stosunkowo niskich wymaganiach co do źródła zasilania.

Energia potrzebna do zapłonu ładunku palnego zależy przede wszystkim od parametrów mieszanki paliwowo-powietrznej tj. składu, ciśnienia, temperatury, prędkości przepływu, kształtu komory spalania. Decydującym czynnikiem jest skład mieszanki i rodzaj paliwa. Zarówno spadek temperatury otoczenia jak i wzrost ciśnienia sprężania mieszanki powodują konieczność zwiększenia energii zapłonu. Dostarczenie odpowiedniej energii zapłonu ograniczone jest możliwościami technicznymi układu zapłonowego, zwłaszcza czasem rozładowania cewki zapłonowej. Sterowanie zapłonem powinno prowadzić do racjonalizacji czasu ładowania uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej.

Zapłon iskrowy uległ wielu zmianom od czasu jego pierwszego zastosowania, zwłaszcza w ciągu ostatnich dwudziestu lat. Zmiany te polegały głównie na wprowadzeniu systemów elektronicznych, zastępujących elementy mechaniczne.

Wraz z zapłonami sterowanymi elektronicznie poprawiła się niezawodność i trwałość całego układu, jednak wprowadzenie czujnika indukcyjnego jako nadajnika impulsów zapłonowych w aparacie zapłonowym pokazała, iż wadą tego układu jest zależność napięcia impulsów od prędkości obrotowej. Powodowało to problemy zwłaszcza w czasie uruchamiania silnika. Zastosowanie czujnika Halla pozwoliło zwiększyć energię iskry i zachować względną stałość wysokiego napięcia w całym zakresie prędkości obrotowej wału korbowego [6].

W aspekcie sterowania zapłonem, układy tranzystorowe dalej posiadały wady związane z regulacją kąta wyprzedzenia zapłonu, sprawnością procesu spalania. Spalanie mieszanki

powinno zachodzić w warunkach stechiometrycznych tj. w sposób całkowity. Współczynnik nadmiaru powietrza:  $\lambda$ , powinien osiągnąć wartość ok. 1. Aby poprawić efektywność spalania mieszanki wprowadzono sterowanie mikroprocesorowe, co pozwoliło na precyzyjne sterowanie zapłonem w całym zakresie pracy silnika. Sterowanie procesem wyzwalania iskry zapłonowej odbywa się za pośrednictwem sygnałów wejściowych nadajników sygnałów, kontrolujących pracę silnika spalinowego. Sterowanie procesem wytwarzania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz przebiegiem jej spalania steruje mikroprocesor, wykorzystujący sygnały wejściowe w sposób wielokrotny, tzn. sygnały czujników służą do określania składu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz do wyznaczenia kąta wyprzedzenia zapłonu. Sytuacja taka spowodowała powstanie zintegrowanych układów wtryskowo-zapłonowych, w których układ zapłonowy jest częścią głównego urządzenia sterującego pracą podzespołów samochodu.

Wielkości fizyczne mierzone -sterowane	Urządzenie sterujące CPU – przetwarzanie sygnałów	Sygnały wyjściowe
Prędkość obrotowa	CPU	Kąt wyprzedzenia zapłonu
Zawartość tlenu w spalinach		Czas wtrysku
Temperatura powietrza zasysanego		Ciśnienie / wydatek pompy
Ciśnienie otoczenia		Wzbogacanie mieszanki na czas rozruchu zimnego silnika
Napięcie akumulatora		Powietrze dodatkowe
Położenie przepustnicy		

Rys.1.1. Przykładowy schemat sterowania zapłonem i składem mieszanki w układzie wtryskowo-zapłonowym

Główne urządzenie sterujące CPU po analizie wielkości fizycznych mierzonych i ich opracowaniu, wydaje komendy urządzeniom wykonawczym / sygnały wyjściowe/.

Komendy urządzeniom wykonawczym wydawane są na podstawie map charakterystyk zapisanych w pamięci mikroprocesora sterującego. Liczba sygnałów wejściowych może zmieniać się w zależności od typu układu sterującego i może osiągać liczbę kilkunastu mierzonych parametrów pracy silnika.

Współczesne układy sterowania posiadają również zdolności adaptacji do zmiennych warunków pracy oraz postępujących procesów zużycia i stanów awaryjnych.

Pomimo dużej precyzji działania układów mikroprocesorowych, kontynuowane są prace nad dalszym doskonaleniem pracy układów zapłonowych. W dalszym ciągu w komorze spalania silnika pozostaje część niespalonego ładunku. Pogarsza to sprawność oraz wpływa niekorzystnie na parametry pracy silnika.

Impulsy zapłonowe we współcześnie stosowanych układach zapłonowych nie są powiązane ze stanami pracy silnika spalinowego tj. takimi, które wymagają w krytycznych momentach zapotrzebowania na dużą energię iskry zapłonowej: rozruchu zimnego silnika, dużych prędkościach obrotowych, gwałtownych przyspieszeniach.

Należałoby zdaniem autora zmieniać parametry układu zapłonowego w zależności od potrzeb energetycznych układu zapłonowego. Jednym z parametrów wpływającym na kształt impulsu zapłonowego jest indukcyjność uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej. Należy jej wartość dopasować do bieżących potrzeb układu zapłonowego. Cechy tej nie mają obecne układy zapłonowe o sterowaniu mikroprocesorowym.

Jednym z najważniejszych parametrów pracy silnika jest moment obrotowy. Powinien pozostać stabilny w całym zakresie prędkości obrotowej i posiadać możliwie maksymalną wartość. Stan taki sprzyja zmniejszeniu zużycia paliwa i obniżeniu emisji toksycznych składników spalin do atmosfery, o czym mowa w dalszej części pracy.

Istnieje konieczność poszerzenia zdolności adaptacyjnych układów zapłonowych. Zdaniem autora możliwości takie stwarza zaproponowane urządzenie wykonawcze w postaci sterowanej cewki zapłonowej.

Układ taki charakteryzuje się uniwersalnym zastosowaniem w samochodach starszej i nowszej generacji.

## **1.2. Cel i hipoteza pracy**

Wymagania stawiane współczesnym układom zapłonowym, zwłaszcza pod względem emisji szkodliwych składników spalin, systematycznie ulegają zaostrzeniu. Obecnie stosuje się od roku 2000 wymagania określone normą EOBD, a od roku 2014 normę emisji toksycznych składników spalin EURO 6. Wpływa to na zwiększony stopień komplikacji budowy układów sterujących zapłonem. Realizacja nowych rozwiązań powoduje potrzebę poszukiwania nowych metod sterowania tymi układami. Autor wskazuje, jego zdaniem, nowe możliwości w tym zakresie.

W związku z tym :

**Celem pracy jest doświadczalne stwierdzenie możliwości poprawy przebiegu krzywej momentu obrotowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym.**

Proponowane rozwiązania powinny uwzględniać takie czynniki jak: niską toksyczność spalin, dopasowanie energii wytworzonej przez układ zapłonowy do poszczególnych stanów pracy, korzystniejszy przebieg momentu obrotowego, uniwersalność zastosowania.

W oparciu o cel pracy założono następującą hipotezę pracy:

**Zmiana parametrów elektrycznych obwodu pierwotnego cewki zapłonowej może wpływać na przebieg momentu obrotowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym.**

Badania na hamowni dotyczyły silnika z zapłonem iskrowym, stykowym/tabela 7.1/ oraz silnika z wtryskiem benzyny i zapłonem iskrowym, bezstykowym, bezrozdzielaczowym sterowanym elektronicznie / tabela 7.2/.

Badania prowadzone były również na stanowiskach pomiarowych Leybold z układami zapłonowymi stykowymi. Prowadzono również badania z użyciem samochodu Opel Astra z zapłonem elektronicznym z czujnikiem Halla. Do badań użyto prototypowej cewki zapłonowej wykonanej przez autora pracy.

Wszystkie te działania pozwolą odpowiedzieć na pytania: Czy możliwa jest poprawa wskaźników eksploatacyjnych, silników spalinowych o zapłonie iskrowym, przez zmianę warunków spalania i czy proponowane rozwiązanie może być zastosowane w układach nowej generacji ?

## 2. BUDOWA I ZASADY DZIAŁANIA BATERYJNEGO UKŁADU ZAPŁONOWEGO

### Rodzaje układów zapłonowych

Do zapłonu w silniku ZI używa się układów zapłonowych z reguły jako akumulatorowych (bateryjnych) lub iskrownikowych. Różnica między nimi polega na wykorzystaniu energii akumulatora w układzie baterijnym lub energii mechanicznej w układzie iskrownikowym, do wytworzenia wysokiego napięcia. Badania przedstawione w dalszej części pracy dotyczą wybranych układów przedstawionych w tabeli 1.1.

Podział akumulatorowych układów zapłonowych przedstawiony poniżej wynika ze zmian chronologicznych zachodzących w systemach ZI.

Podział układów zapłonowych

Tabela 1.1

Rodzaj układu	mechaniczny /przerywacz/	tranzystorowy	elektroniczny	mikroprocesorowy
Sposób wyzwania iskry	mechaniczny	elektroniczny	elektroniczny	elektroniczny
Regulacja kątem zapłonu	mechaniczna	mechaniczna	elektroniczna	elektroniczna
Wytworzenie WN	indukcyjne	indukcyjne	indukcyjne	indukcyjne
Rozdział WN do cylindrów	mechaniczny	mechaniczny	elektroniczny	elektroniczny

### 2.1 Przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym

Podstawowym podzespołem każdego pojazdu jest układ zapłonowy, umożliwiający zainicjowanie spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Zapłon mieszaniny paliwowo-powietrznej następuje, gdy ich temperatura osiągnie określoną wartość - temperaturę zapłonu.

W układach zapłonowych do zapoczątkowania spalania stosuje się wyładowanie elektryczne w postaci iskry między elektrodami świecy zapłonowej. Warunkiem powstania wyładowania elektrycznego jest dostarczenie do elektrod świecy zapłonowej odpowiednio wysokiego napięcia, które spowoduje jonizację gazu (powstanie jonu z obojętnego atomu lub cząsteczki) wystarczającą do przepływu prądu elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej.



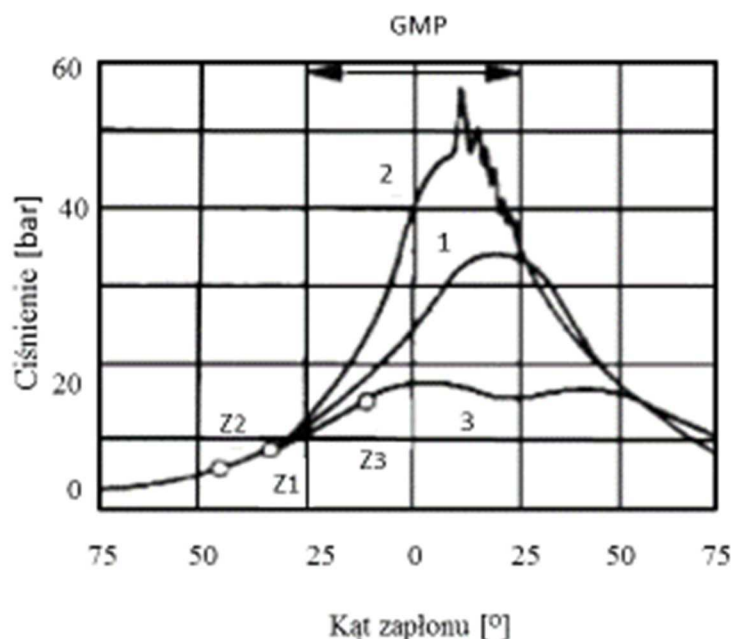
Od wyładowania iskrowego następuje zapalenie mieszaniny palnej. Następuje podgrzewanie dalszych jej części od płomienia i szybki wzrost temperatury. Proces zapoczątkowany zostaje w bardzo małej objętości gazu w przestrzeni między elektrodami świecy. Powoduje to powstanie warunków do rozprzestrzenienia się płomienia na całą objętość ładunku. Prędkość rozchodzenia się płomienia zależna jest od właściwości paliwa, składu i struktury mieszaniny oraz innych czynników. Prędkość rozchodzenia się płomienia wynosi: 30- 60m/s [48].

Proces spalania, ( mimo, że przebiega bardzo szybko ), dla prędkości obrotowej wału korbowego równej 5000 obr/min. trwa ok. 1ms. i jest procesem wieloetapowym[75]. Spalanie rozpoczyna się, gdy tłok znajduje się ok. 15...35° przed górnym martwym położeniem tłoka (GMP). Od chwili przeskoku iskry do pojawienia się czoła płomienia, zachodzi pierwszy etap - zwany okresem indukcji. W tym czasie prędkość reakcji chemicznych zależy od składu mieszanki, jej temperatury i ciśnienia oraz od dokładności rozpylenia paliwa i odparowania a także od energii źródła zapłonu. W tym okresie ciśnienie w cylindrze nieznacznie wzrasta, następuje sprężanie ładunku w cylindrze.

Faza druga to rozprzestrzenianie się płomienia w całej objętości mieszanki. W tym czasie płomień wypełnia całą objętość komory spalania i wydziela się główna część ciepła ze spalanej mieszaniny. Po przejściu przez tłok zwrotu zewnętrznego ciśnienie w cylindrze osiąga maksimum. Proces spalania kończy się 25 do 30 stopni po GMP , kiedy to temperatura w cylindrze osiąga najwyższą wartość. Okres ten charakteryzuje się tym, że prędkość spalania praktycznie nie zależy od fizykochemicznych właściwości spalanego gazu a czas trwania tego okresu zależy od intensywności zawirowań w komorze, od kształtu komory spalania, położenia świecy zapłonowej, a także od zawartości spalin pozostałych z poprzedniego cyklu.

Ostatnia faza spalania to dopalenie resztek mieszanki znajdujących się poza czołem płomieni i na obrzeżach ścianek cylindra i tłoka. W tym okresie prędkość reakcji i ilość wydzielonego ciepła maleją. Faza ta, ze względu na to, że powiększająca się przestrzeń cylindra powoduje straty ciepła, powinna być jak najkrótsza.

Wymienione fazy spalania przebiegają bardzo szybko i zachodzą na siebie. Jedną z metod dokładnego zbadania zachodzących zjawisk jest wykreślenie wykresu indykatorowego. Reakcja spalania wywołuje w cylindrze zmiany ciśnienia. Analizując zmiany w funkcji obrotu wału korbowego lub w funkcji objętości cylindra nad tłokiem, można prześledzić przebieg procesu spalania. Przykład takiego wykresu przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Przebieg wartości ciśnienia w komorze spalania przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu

1 - optymalny punkt zapłonu 2 - zapłon wczesny 3 - zapłon późny [6]

Wykres 1 obrazuje przebiegi procesu spalania mieszanki w cylindrze. Wyzwolenie zapłonu musi się zacząć w takim momencie, aby ciśnienie w cylindrze osiągnęło swój szczyt tuż po przejściu przez tłok zwrotu zewnętrznego ( tj.  $35^\circ$  do  $15^\circ$  przed GMP).

Między momentem zapłonu a wystąpieniem płomienia w całej objętości mieszanki istnieje pewna zwłoka, spowodowana prędkością rozprzestrzeniania się czoła płomienia, dlatego reakcja spalania musi się zacząć podczas suwu sprężania.

Szczególne znaczenie ma kąt, o jaki obróci się wał korbowy pomiędzy zapłonem mieszanki a zwrotem zewnętrznym. Kąt ten ma ogromny wpływ na pracę silnika, na jego moc, zużycie paliwa i toksyczność spalin.

W przypadku, kiedy mieszanka zostaje zapalona zbyt wczesnie to ciśnienie zamiast działać zgodnie z ruchem tłoka, przeciwdziała mu. Powoduje to powstawanie dużych obciążeń układu korbowego. Zbyt późny zapłon powoduje, że maksymalna wartość ciśnienia w cylindrze występuje później względem idealnego zapłonu i przypada na suw rozprężania. Dla silnika objawia się to niekorzystnymi skutkami w postaci pogorszenia ogólnej sprawności silnika. Skutki te grożą zatarciem silnika. Obydwa przypadki niewłaściwego zapłonu są przyczyną zmniejszonej mocy silnika i zwiększonego zużycia paliwa.

Innym niekorzystnym zjawiskiem jest samozapłon. Zwykle wywołany jest on miejscowym podgrzaniem mieszaniny palnej powyżej temperatury zapłonu, przez przegrzane metalowe części lub nagar na ściankach komory spalania [48,63,75]. Samozapłon może być

przyczyną innego zjawiska, jakim jest spalanie stukowe. Prędkość przenoszenia płomienia podczas spalania stukowego może przekroczyć 1000 m/s. W komorze spalania powstają niekontrolowane wahania ciśnienia, powodujące obciążenie mechanizmu korbowego i spadek sprawności silnika. W czasie spalania stukowego pojawia się charakterystyczny metaliczny dźwięk [63,75].

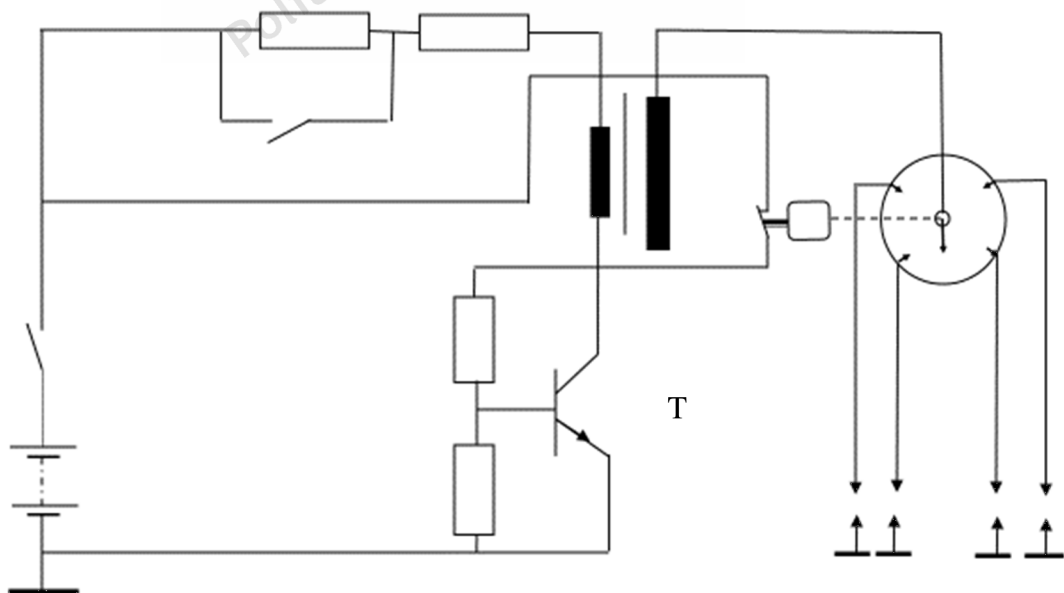
## 2.2. Układy zapłonowe gromadzące energię elektryczną w indukcyjności

W systemach zapłonowych energia elektryczna jest gromadzona w polu magnetycznym cewki zapłonowej lub rzadziej wykorzystywany sposób, w polu elektrycznym kondensatora. Energia ta przetwarzana jest na energię impulsu zapłonowego za pomocą cewki zapłonowej.

Ze względu na sposób gromadzenia energii wyróżniamy dwa podstawowe systemy zapłonowe:

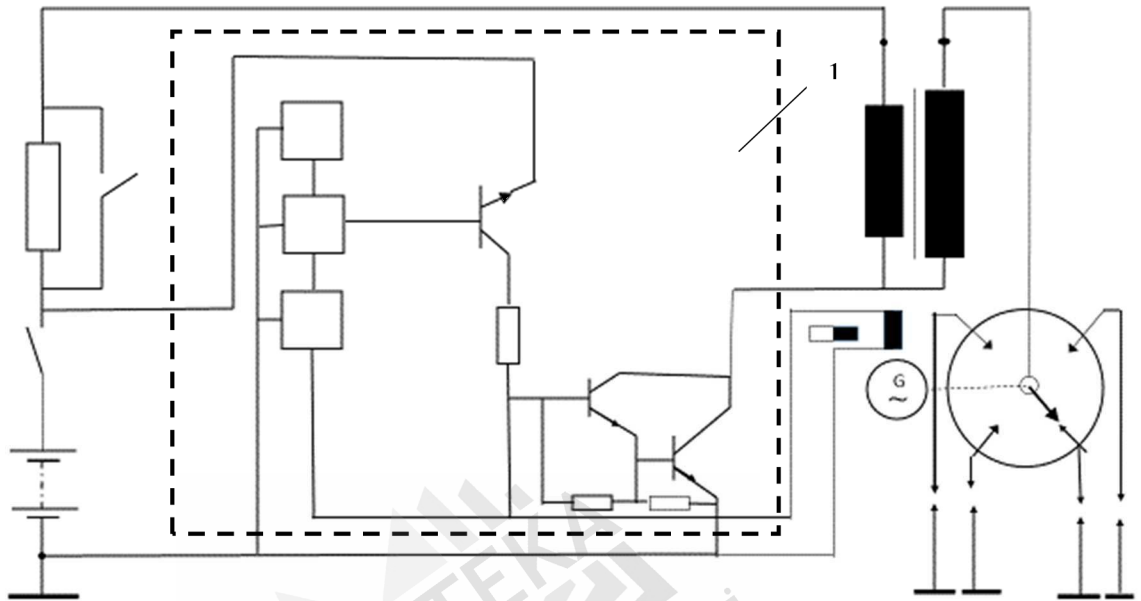
- z energią gromadzoną w indukcyjności;
- z energią gromadzoną w pojemności.

Budowa układu zapłonowego gromadzącego energię w polu magnetycznym przedstawiona jest na rysunku 2.2 :



Rys.2.2. Budowa elektronicznego układu zapłonowego gromadzącego energię w polu magnetycznym [26]

Sterowanie cewką zapłonową w układzie z rysunku 2.2 realizowane jest za pomocą klucza tranzystorowego T, sterowanego impulsowo przez prąd bazy.



Rys.2.3. Budowa mikroprocesorowego układu zapłonowego [26]

W układzie zapłonowym przedstawionym na rysunku 2.3 cewka zapłonowa sterowana jest za pomocą urządzenia sterującego 1. W skład urządzenia sterującego wchodzi elektroniczne: układy stabilizujące, sterujące kątem wyprzedzenia zapłonu, przekształtnik impulsów i urządzenia dodatkowe. Sterowanie cewką zapłonową odbywa się impulsowo wg. metody PWM ( Pulse Width Modulation).

W ten sposób reguluje się czas narastania prądu w uzwojeniu pierwotnym cewki zapłonowej ( w literaturze samochodowej czas ten nazywany bywa tradycyjnie czasem zwarcia).

Metodą PWM sterowane są również inne podzespoły współczesnego samochodu tj.: zespół regulacji prędkości obrotowej biegu jałowego, regulacja napięcia w alternatorze samochodowym, nastawnik przepustnicy powietrza.

Przebieg pracy układu zapłonowego przebiega w trzech cyklach:

1. Czas gromadzenia energii, w którym następuje zwarcie obwodu pierwotnego i narastanie prądu w uzwojeniu pierwotnym cewki zapłonowej.
2. Okres wytworzenia wysokiego napięcia, w którym następuje przerwanie obwodu pierwotnego i powstanie napięcia na uzwojeniu wtórnym.

3. Czas wyładowania iskrowego pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej.

**Cykl 1:** rozpoczyna się w momencie zamknięcia obwodu pierwotnego, powodując połączenie uzwojenia pierwotnego (o rezystancji  $R_1$ ) cewki zapłonowej z akumulatorem przez zacisk 15. We współczesnych rozwiązaniach napięcie to zostaje pomniejszone o spadki napięć na złączu kolektor – emiter tranzystora sterującego.

Z uwagi na duży pobór mocy podczas rozruchu samochodu producenci samochodów montują w pojazdach dwa akumulatory. Jeden służy do zasilania obwodu rozruchu a drugi do zasilania urządzeń sterujących pracą pozostałych podzespołów.

Dla modelu matematycznego rzeczywistej cewki  $L_1$  (nie uwzględniając indukcyjności wzajemnej  $L_1$  i  $L_2$ ), w postaci szeregowego połączenia  $R_1$  i  $L_1$  prąd  $i_1$  wzrasta według krzywej wykładniczej wyrażonej wzorem, tj.:

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.1)$$

gdzie:

$U_1$  – napięcie zasilania cewki zapłonowej,

$R_1$  – rezystancja uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej wraz z rezystancjami biorącymi udział w torze prądowym,

$\tau$  - stała czasowa cewki, zależy od indukcyjności  $L_1$  oraz rezystancji  $R_1$ .

Asymptotą tego przebiegu jest wartość ustalona, która wynosi:

$$I_{ust} = \frac{U_1}{R_1}. \quad (2.2)$$

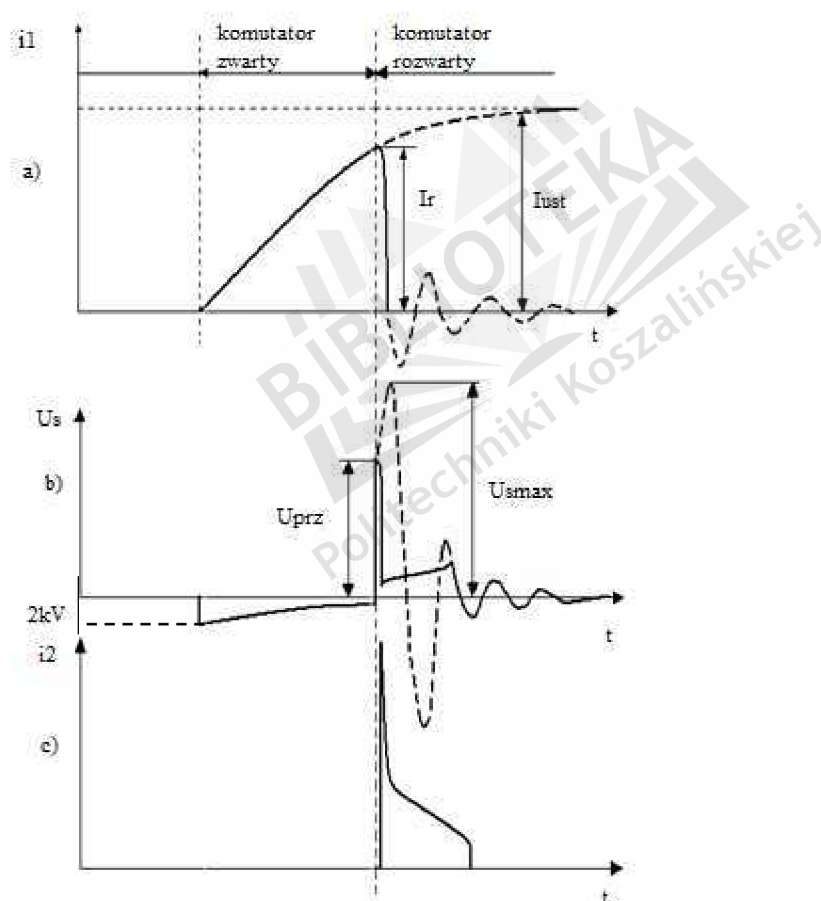
Przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym cewki zapłonowej przedstawiono na rys. 2.4a. Po czasie  $t = 3\tau$  od zwarcia obwodu pierwotnego cewki zapłonowej, prąd osiąga 95% wartości ustalonej. Natomiast ok. 100% wartości osiąga po czasie zwarcia równym około  $5\tau$ . Czas ten jest zależny od stałej czasowej  $\tau$ , zależnej od parametrów cewki:

$$\tau = \frac{L_1}{R_1}. \quad (2.3)$$

W wyniku powolnego wzrastania prądu  $i_1$  w stosunku do zmian sygnału sterującego pracą układu zapłonowego, także powoli wzrasta strumień magnetyczny w uzwojeniu pierwotnym i co się z tym wiąże, siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wtórnym. Osiąga wartość ok. 2000V i jest skierowana przeciwnie niż w fazie zaniku strumienia magnetycznego.

Tak niska wartość napięcia jest niewystarczająca do przeskoku iskry na świecy zapłonowej. Przebieg napięcia wtórnego przedstawiono na wykresie rys.2.4b.

W praktyce czas zwarcia trwa krócej niż  $5\tau$  i prąd nie osiąga swojej wartości maksymalnej, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Przekłada się to bezpośrednio na mniejszy strumień magnetyczny a w konsekwencji, na mniejszą siłę elektromotoryczną indukowaną po stronie wtórnej cewki.



Rys.2.4. Zależność przebiegów prądów i napięcia od okresu pracy cewki zapłonowej:

- a) dla prądu w uzwojeniu pierwotnym, b) dla napięcia wtórnego, c) dla prądu w uzwojeniu wtórnym cewki zapłonowej[48]

**Cykl 2.** Okres wytworzenia wysokiego napięcia, w którym następuje rozwarcie obwodu pierwotnego cewki zapłonowej i powstanie napięcia wtórnego.

Przy wartości prądu w uzwojeniu pierwotnym oznaczonym na rysunku 2.4 jako

$i_r$  następuje przerwanie obwodu pierwotnego.

Po przerwaniu obwodu pierwotnego następuje gwałtowny zanik prądu  $i_l$ . Dynamikę zaniku tego prądu potęguje ładowanie się pojemności obwodu pierwotnego, a następnie wskutek ich rozładowywania prąd zmienia swój kierunek i zanika przy malejących drganiach. Następstwem tego jest gwałtowne zmniejszenie strumienia magnetycznego wytworzonego przez ten prąd. Na skutek gwałtownego zaniku strumienia magnetycznego indukuje się w uzwojeniu pierwotnym zmienna siła elektromotoryczna samoindukcji  $E_l$  o wartości maksymalnej rzędu 200...300V.

W momencie przerwania, obwód pierwotny, staje się obwodem szeregowym  $R_l L_l C_l$  wywołującym drgania harmoniczne tłumione o częstotliwości 1,5 – 3 kHz , wyrażone wzorem :

$$f_0 \approx \frac{1}{2\sqrt{L_l C_l^*}} \quad (2.4)$$

Pojemność  $C_l^*$  zawiera w sobie wartość pojemności obwodu pierwotnego  $C_l$  i pojemności obwodu wtórnego  $C_2$ . Jej wartość można wyznaczyć według zależności:

$$C_l^* = C_l + C_2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2, \quad (2.5)$$

$C_l^*$  - pojemność wypadkowa,

$C_l$  - pojemność obwodu pierwotnego,

$C_2$  - pojemność obwodu wtórnego,

$N_1$  - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,

$N_2$  - liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

W takt tych drgań następuje cykliczna przemiana energii zakumulowanej w polu magnetycznym, w energię pola elektrycznego przy równoczesnym wydzielaniu ciepła. Zmiany strumienia magnetycznego powodują powstanie napięcia po stronie wtórnej cewki zapłonowej. Jeśli nie nastąpiłby zapłon łuku elektrycznego po stronie wtórnej cewki to, wartość napięcia wtórnego przebiegałaby zgodnie z częścią kreskowaną wykresu, na rys.2.4b. Napięcie na uzwojeniu wtórnym, zgodnie z prawami prądu zmiennego, osiągnęłoby wartość maksymalną  $U_{smax}$  w momencie przechodzenia wartości strumienia magnetycznego a więc i prądu  $i_l$  przez 0.

Wychodząc z bilansu energii pola magnetycznego i pola elektrycznego można, obliczyć szczytową wartość napięcia wtórnego  $U_{smax}$  .

Energia zgromadzona w polu magnetycznym cewki  $L_l$  w momencie przerwania obwodu pierwotnego wynosi:

$$W_L \approx \frac{1}{2} L_1 i_r^2. \quad (2.6)$$

Ze wzoru (2.6) wynika, iż w wyniku gwałtownego zaniku prądu  $i_r$ , maleje również energia magnetyczna cewki  $W_L$  przekształcając się w energię pola elektrycznego. W procesie tym wytwarza się także energia cieplna, wydzielająca się pod wpływem oscylacji prądu w uzwojeniu pierwotnym. Gdy prąd uzwojenia pierwotnego  $i_r$  malejąc, osiąga pierwszy raz wartość zerową ( patrz rys.2.4a), napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym  $U_{2\max}$  osiąga swoją wartość maksymalną, podobnie jak napięcie w uzwojeniu pierwotnym  $U_{p\max}$ . Równocześnie zanika energia pola magnetycznego, towarzysząca przepływowi prądu elektrycznego, przeobrażając się w sumę energii pól elektrycznych i energii cieplnej  $Q$ .

$$W_L = W_{EI1} + W_{EI2} + Q, \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{2} L_1 i_r^2 \approx \frac{1}{2} C_1 U_{1\max}^2 + \frac{1}{2} C_2 U_{2\max}^2 + HQ, \quad (2.8)$$

gdzie:

$W_L$  - energia zgromadzona w polu magnetycznym cewki  $L_1$  w momencie zaniku prądu pierwotnego,

$W_{EI1}$  - energia pola elektrycznego w uzwojeniu pierwotnym,

$W_{EI2}$  - energia pola elektrycznego w uzwojeniu wtórnym,

$Q$  - energia cieplna Joule'a,

$C_2$  – pojemność obwodu wtórnego.

Napięcie pierwotne  $U_{p\max}$  jest transformowane na stronę wtórną z przekładnią  $\frac{N_2}{N_1}$ , osiągając wartość do 20kV

$$U_{s\max} \approx \frac{N_2}{N_1} U_{p\max}. \quad (2.9)$$

Wartość maksymalną napięcia  $U_{s\max}$  cewki  $L_2$  [ 54, 46] uzyskuje się przekształcając wzór ( 2.8), przy pominięciu  $Q$  dla uproszczenia wzoru, otrzymano:

$$U_{2\max} \approx i_r \sqrt{\frac{L_1}{C_1 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 + C_2}}. \quad (2.10)$$

Analiza wzoru (2.10) dowodzi, że maksymalna wartość napięcia wtórnego cewki jest proporcjonalna do prądu  $i_r$ , płynącego w obwodzie pierwotnym, podczas przerwania obwodu pierwotnego. Natomiast zmniejsza się przy powiększaniu wartości pojemności  $C_1$  oraz pojemności  $C_2$  (rzędu  $10^{-10}$  F), na którą składają się pojemności kabli wysokiego napięcia, świec i cewki zapłonowej.



Poza tym można wysunąć wnioski, że celowe zwiększanie pojemności obwodu wtórnego, poprzez ekranowanie przewodów zapłonowych w celu przeciwdziałania zakłóceniom radioelektrycznym, powoduje obniżenie wartości  $U_{smax}$ .

**Cykl 3.** Czas wyładowania iskrowego pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej.

Etap ostatni rozpoczyna się w chwili, gdy uzwojenie wtórne zostaje połączone ze świecą zapłonową. Napięcie wtórne osiąga wtedy wartość  $U_{prz}$ , (rys.2.4b). Napięcie wtórne, w wyniku przeskoku iskry nie osiąga wartości maksymalnej  $U_{smax}$ , tylko wartość napięcia zapłonu łuku elektrycznego na elektrodach świecy. Linia ciągła na rys. 2.4b obrazuje rzeczywisty przebieg napięcia wtórnego  $U_s$  przy zapłonie łuku na świecy.

Z analizy bilansu energii układu zapłonowego, stwierdzić można, że w cyklu trzecim energia cewki zapłonowej składa się z energii pola elektrycznego i energii pola magnetycznego. Wartości tych energii różnią się znacznie w porównaniu do cyklu drugiego gdyż od tamtej chwili prąd pierwotny już zmalał. Powoduje to spadek energii magnetycznej zgromadzonej w polu magnetycznym uzwojenia  $L_2$ , na rzecz energii elektrycznej wyrażonej wzorem:

$$W_{El} = \frac{1}{2} C_1 \left( \frac{N_1}{N_2} U_z \right)^2 + \frac{1}{2} C_2 U_z^2 - \frac{1}{2} C_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 H C_2 U_z^2, \quad (2.11)$$

gdzie:  $W_{EL}$  oznacza energię elektryczną,  
 $C_1$  - pojemność strony pierwotnej,  
 $C_2$  - pojemność strony wtórnej,  
 $N_1$  - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,  
 $N_2$  - liczba zwojów uzwojenia wtórnego,  
 $U_z$  - napięcie zapłonu.

Duża energia elektryczna oraz mniejsza magnetyczna zgromadzona w polu magnetycznym cewki  $L_2$  zostają pochłonięte przez energię wyładowania iskrowego. Rysunek 2.4c przedstawia przebieg tego procesu. Wyładowanie na elektrodach świecy charakteryzuje się dwoma fazami. Pierwsza to wyładowanie iskrowe o charakterze pojemnościowym, druga natomiast to wyładowanie łukowe i jarzeniowe o charakterze indukcyjnym.

Wyładowanie pojemnościowe przebiega bardzo szybko. Okres trwania to ok.  $1 \mu s$ , przy mocach dochodzących do setek kW. Wyładowanie to jest inicjatorem zapalenia mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania silnika podczas normalnej pracy.

Jak wskazuje nazwa tej fazy jest to okres, w którym wyzwala się energia nagromadzona w pojemności układu zapłonowego. Faza ta charakteryzuje się bardzo dużym natężeniem prądu do ok. 100A, czemu towarzyszy prawie zupełny zanik napięcia. Widocznym efektem

trwania składowej pojemnościowej jest jasno niebieskie zabarwienie iskry, a jej temperatura osiąga 10000 °C. Wyładowanie pojemnościowe jest głównym inicjatorem zapłonu. Efektem wyładowania pojemnościowego są zakłócenia elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości, powstające w trakcie tego okresu.

Wyładowanie indukcyjne, pochodzące z energii pola magnetycznego wykorzystuje spadek oporności pomiędzy elektrodami świecy przy wyładowaniu iskrowym energii pola elektrycznego. Wyładowanie indukcyjne przebiega dwuetapowo: pierwsze następuje wyładowanie łukowe, a następnie wyładowanie jarzeniowe. Cechy okresu indukcyjnego są przeciwieństwem wyładowania pojemnościowego. Czas wyładowania trwa kilka milisekund. Natężenie prądu wynosi 30 do 60 mA przy wysokim napięciu rzędu 1500 do 2000V.

Wyładowanie indukcyjne wykorzystywane jest przy rozruchu zimnego silnika do zapłonu niejednorodnej lub przechłodzonej mieszanki paliwowej. Wówczas dzięki długiemu okresowi trwania wyładowania mieszanka niejednorodna zostaje podgrzana i opary paliwa zostają zapalone. Znakiem rozpoznawczym wyładowania indukcyjnego jest słaba barwa czerwono-fioletowa iskry na świecy zapłonowej. W praktyce energię iskry oblicza się ze wzoru [17]:

$$E_i = \frac{1000U_1 i_p t_2}{2} \text{ [mJ]}, \quad (2.12)$$

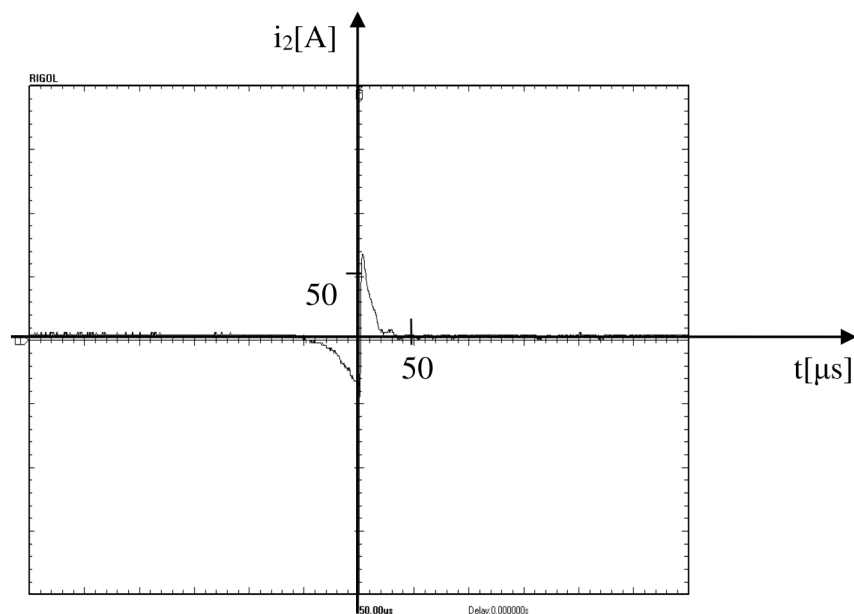
gdzie:  $E_i$  - energia iskry [mJ],

$U_1$  – średnie napięcie łuku [V], jest to tzw. napięcie spalania, widoczne jako pozioma linia na rysunku 2.4b, po wartości maksymalnej, napięcia iskry,

$i_p$  – maksymalny prąd wyładowania [A],

$t_2$  - czas wyładowania[s].

Na rysunku 2.5. widoczne są fazy przebiegu wyładowania iskrowego. Przed wartością maksymalną napięcia iskry, można zaobserwować proces ładowania się wszystkich pojemności obwodu wtórnego w tym pojemności między elektrodami świecy zapłonowej. Po tym etapie następuje przebiecie iskrowe. Przebieg tego procesu jest różny dla każdego wyładowania. Wynika to faktu, iż każda iskra jest wynikiem stochastycznego procesu wielu zmiennych tj. niejednorodności składu mieszanki, niejednorodności rozkładu temperatury oraz zużyciem eksploatacyjnym.



Rys.2.5. Przykładowy przebieg prądu iskry w [A]

Na rys.2.5 przed igłą prądu iskry widać proces ładowania się wszystkich pojemności obwodu wtórnego układu zapłonowego. W literaturze proces ten pominięto [rys.2.4c/].

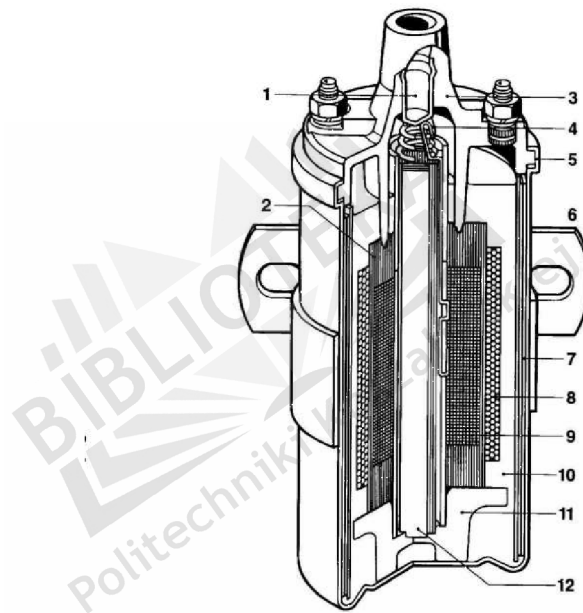
### 2.3. Budowa i parametry cewek zapłonowych

Podstawowym warunkiem dla prawidłowego zapłonu jest zapewnienie dostatecznej energii iskry, która będzie wystarczająca w możliwie najszerszym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ , ciśnienia sprężania i prędkości zawirowania ładunku. Kluczowe znaczenie mają tutaj parametry cewki zapłonowej, a przede wszystkim jej napięcie po stronie wtórnej.

Aby wywołać zapłon mieszanki jednorodnej (bez lokalnych zmian składu mieszanki) oraz stechiometrycznej, potrzebna jest energia około 1 mJ. Oznacza to, że dla czasu trwania iskry ok. 1ms, moc wystarczająca do zapłonu mieszanki idealnej wynosi ok. 1W. W przypadku rzeczywistych warunków pracy silnika, dla zapewnienia prawidłowego przebiegu zapłonu, energia impulsu zapłonowego może dochodzić do 50 mJ. W celu gromadzenia tej energii do czasu jej spożytkowania dla zapłonu mieszanki, stosuje się cewki zapłonowe wysokiego napięcia. Cewka zapłonowa ma za zadanie przetworzenie niskiego napięcia dostarczonego przez akumulator na napięcie wysokie, w celu wymuszenia przeskoku iskry na świecy.

## Budowa cewki konwencjonalnej

Klasyczna cewka zapłonowa zbudowana jest z dwóch uzwojeń. Uzwojenie pierwotne (8) posiada od 250 do 400 zwojów wykonanych z drutu miedzianego emaliowanego o średnicy od 0,2 do 0,8 [mm]. Uzwojenie wtórne (9) posiada zaś od 19000 do 26000 zwojów wykonanych z drutu miedzianego w emalii o średnicy od 0,1 do 0,2 mm, dodatkowo odizolowanych między warstwami przekładkami izolującymi (2), zapobiegającymi przed przebiciem między warstwami uzwojeń. Budowę konwencjonalnej cewki zapłonowej przedstawiono na rys. 2.6.



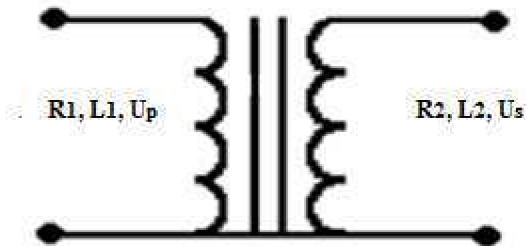
Rys.2.6. Budowa cewki konwencjonalnej [2,32], opis w tekście

Uzwojenia nawinięte są na wspólnym rdzeniu (12), wykonanym z blach transformatorowych. Uzwojenie pierwotne nawinięte jest na uzwojeniu wtórnym. Jeden koniec uzwojenia wysokiego napięcia wprowadzony jest do gniazda wysokiego napięcia (1) w pokrywie cewki, drugi koniec łączony jest z początkiem uzwojenia pierwotnego oraz masą samochodu. Uzyskuje się w ten sposób połączenie uzwojeń podobnie jak w autotransformatorze, co upraszcza konstrukcję cewki i zmniejsza liczbę wyprowadzanych zacisków. Obydwa końce uzwojenia pierwotnego wyprowadza się do zacisków umieszczonych w pokrywie. Wszystko to umieszcza się w puszcze (7) o dnie z materiału izolacyjnego (11), wypełnia masą zalewową lub olejem transformatorowym (10) i przykrywa szczelnie pokrywą (3).

## Parametry cewek zapłonowych

Najważniejsze parametry określające właściwości cewek wysokiego napięcia to:

- $R_1$  - rezystancja uzwojenia pierwotnego,
- $R_2$  - rezystancja uzwojenia wtórnego,
- $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego,
- $p$  - przekładnia zwojowa,
- $U_s$  - napięcie w uzwojeniu wtórnym,
- $L_2$  - indukcyjność uzwojenia wtórnego.



Rys.2.7. Parametry cewki zapłonowej

**Rezystancja uzwojenia pierwotnego** jest parametrem warunkującym przepływ prądu pierwotnego o określonej wartości. Rezystancja ta zależna jest od długości i średnicy drutu i rezystywności materiału z jakiego jest wykonana. Przykładowo dla zapłonu mechanicznego uzwojenie pierwotne składa się z 200 do 400 zwojów drutu miedzianego emaliowanego o średnicy 0,7 do 0,8 mm. Jeżeli natomiast uzwojenie pierwotne wykonane jest z drutu aluminiowego o większej oporności właściwej niż miedź, średnica jego jest większa. Rezystancja  $R_1$  takiego uzwojenia wynosi około  $3\Omega$ . Z tego wynika, że przy napięciu akumulatora  $U = 12V$ , prąd ustalony płynący w obwodzie pierwotnym wyniesie około 4A. Przy stosowaniu rezystora szeregowo połączonego z uzwojeniem pierwotnym o wartości zwykle  $1,5\Omega$  wartości prądu będą podobne, gdyż rezystancja cewki w takim przypadku jest mniejsza i wynosi ok.  $1,5\Omega$ . Tak więc, w mechanicznych układach zapłonowych prąd ustalony wynosi 4 do 5A.

W elektronicznych układach rezystancja uzwojenia pierwotnego jest mniejsza i wynosi przeważnie poniżej  $1\Omega$ .

Wynika to z faktu zastąpienia przerywacza mechanicznego tranzystorem o wyższej wytrzymałości prądowej. Wyliczając prąd dla rezystancji uzwojenia pierwotnego np.  $0,75\Omega$ , wartość prądu wynosi 16 A. Oczywiście aż tak duża wartość nie jest potrzebna do prawidłowego przebiegu procesu i jest elektronicznie ograniczana do natężenia 8A w celu uniknięcia przeciążenia obwodu i przegrzania cewki.

**Rezystancja uzwojenia wtórnego** jest to oporność drutu nawiniętego po stronie wtórnej cewki, w którym powstaje wysokie napięcie. Dla zapłonu klasycznego uzwojenie wtórne składa się z 19 000 do 26 000 zwojów drutu miedzianego, emaliowanego, o średnicy 0,07 do 0,10 mm, a rezystancja waha się w granicach 6...8kΩ.

**Indukcyjność uzwojenia pierwotnego** w cewkach klasycznych wynosi kilkanaście mH, w cewkach układów sterowanych elektronicznie kilka mH, tj. 1 do 7mH. Indukcyjność jest zależna od wymiarów geometrycznych cewki, przenikalności magnetycznej oraz liczby zwojów.

**Indukcyjność uzwojenia wtórnego** wynosi ok.30 do 40 [mH].

**Napięcie w uzwojeniu wtórnym** jest to napięcie, jakie możemy uzyskać w uzwojeniu wtórnym przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego napięciem znamionowym. Podawane jest zazwyczaj napięcie przy znamionowym obciążeniu, oznacza to że cewka nieobciążona ma napięcie wtórne wyższe od danego.

**Przekładnia zwojowa** jest to stosunek liczby zwojów uzwojenia pierwotnego  $N_1$  do liczby zwojów uzwojenia wtórnego  $N_2$ .

$$p = \frac{N_1}{N_2}. \quad (2.13)$$

#### 2.4. Wpływ parametrów cewki na wartość wysokiego napięcia

Podstawowym źródłem zmian parametrów wysokiego napięcia są procesy komutacji zachodzące w uzwojeniu pierwotnym.

Ze wzoru na szybkość narastania prądu w uzwojeniu pierwotnym, wynika:

$$\frac{di_1}{dt} \geq \frac{U_1}{L_1} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.14)$$

gdzie:

$i_1$  - prąd w uzwojeniu pierwotnym,

$t$  - czas,

$L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego,

$U_1$  - napięcie na uzwojeniu pierwotnym.

Można stwierdzić, iż szybkość narastania prądu zależy od stałej czasowej cewki  $\tau$ , która wyraża stosunek indukcyjności  $L_1$  do wartości rezystancji  $R_1$  tego uzwojenia (2.3).

Dla czasu zamknięcia obwodu pierwotnego równego zero czyli w początkowym okresie wzór (2.15) przybiera następującą postać:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_p}{L_1}. \quad (2.15)$$

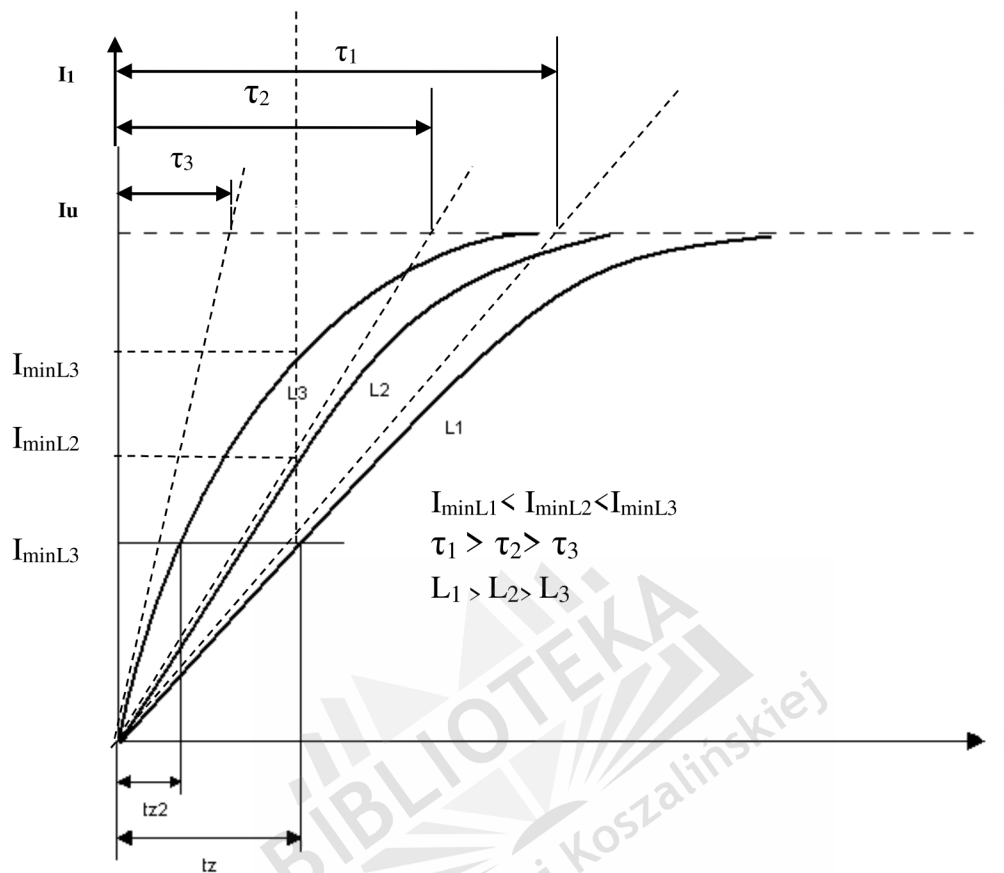
Z zależności 2.15 wynika, że w początkowej fazie tego cyklu prędkość narastania prądu w uzwojeniu pierwotnym, przy zachowaniu niezmiennego napięcia  $U_p = \text{const.}$ , zależy jedynie od indukcyjności  $L_1$ .

Ze względu na ograniczoną zdolność przepływu prądu przez element zamykający obwód pierwotny cewki wartość prądu dla czasu zamknięcia dążącego do nieskończoności wynosi około 4,5 A (dla układów elektronicznych jest to wartość wyższa). Jest to metoda obliczenia rezystancji uzwojenia pierwotnego  $R_1$  zmniejszająca zakres wartości prądu w uzwojeniu pierwotnym:  $I_1 = U_p / R_1$ .

Z przedstawionej zależności (2.15) wynika, że dla mniejszych wartości indukcyjności  $L_1$  szybkość narastania prądu  $i_1$  jest większa oraz wartość prądu po ustalonym czasie  $t_z$  jest większa. Obrazują to trzy różne przebiegi prądu na rys. 2.10 dla różnych wartości indukcyjności  $L_1 > L_2 > L_3$ . Dla uproszczenia rozważań przyjęto stałą wartość  $R_1$  we wszystkich trzech przypadkach.

Zwiększenie indukcyjności  $L_1$  uzwojenia pierwotnego powoduje teoretycznie poprawę własności mechanicznego układu zapłonowego.

Większej wartości indukcyjności  $L_1$  odpowiada większa ilość energii, lecz zwiększona wartość siły elektromotorycznej samoindukcji cewki  $L_1$  powoduje silniejsze iskrzenie na komutatorze mechanicznym.

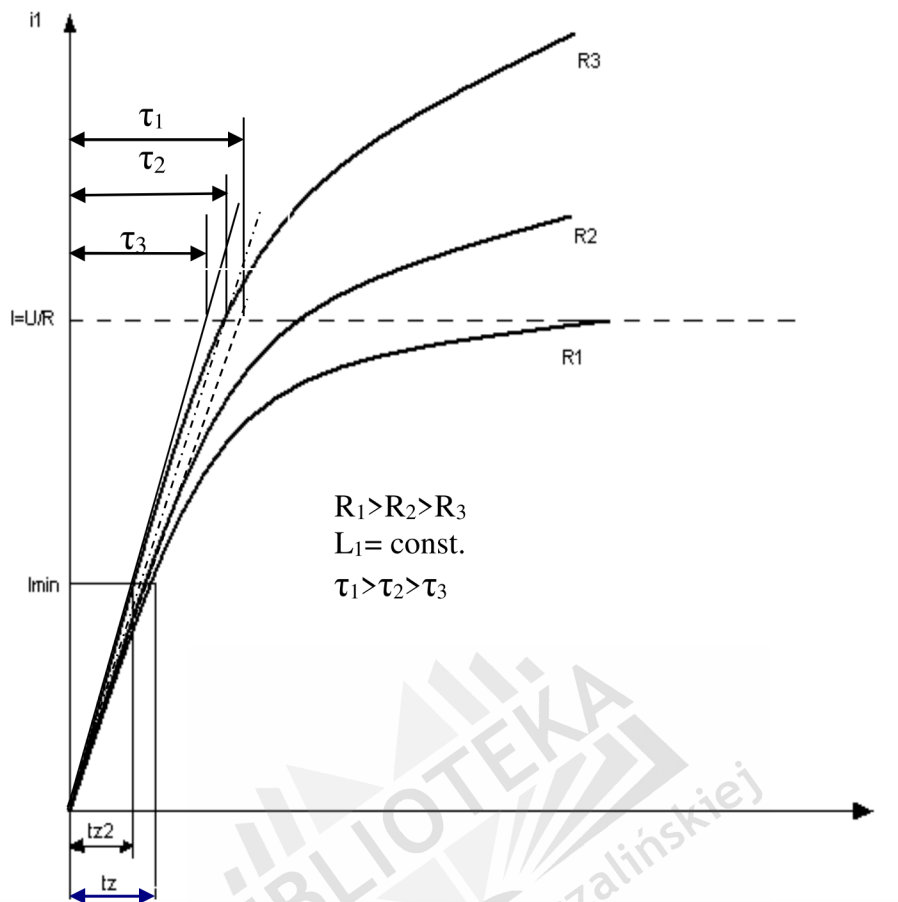


Rys. 2.8. Zależność narastania prądu  $i_1$  w cewce zapłonowej dla  $R_1 = \text{const}$  [48]

Z rysunku 2.8 wynika, że w silnikach o dużej liczbie cylindrów, gdzie czas zamknięcia obwodu pierwotnego  $t_{z2}$  jest krótszy niż w silnikach o mniejszej liczbie cylindrów  $t_z$ , prąd osiąga mniejsze wartości, stąd cewki silników o dużej liczbie cylindrów, muszą mieć mniejszą indukcyjność uzwojenia pierwotnego.

Ustalając wartość indukcyjności  $L_1$  na określonym poziomie można zwiększać wartość prądu poprzez zmniejszenie rezystancji uzwojenia pierwotnego. Na rys. 2.9, pokazano, że gdy rezystancja uzwojenia pierwotnego jest mniejsza, tym charakterystyka jest bardziej stroma i prędkość narastania prądu wzrasta. Wzrasta także wartość prądu otrzymywana przy tym samym czasie zwarcia.





Rys.2.9. Zależność narastania prądu  $i_1$  w cewce zapłonowej dla  $L_1 = \text{const}$  [17,32]

W początkowym okresie dla czasu  $t_z$  bliskiemu zero, prędkość narastania prądu zależy w niewielkim stopniu od wartości rezystancji i jest zbliżona dla różnych typów uzwojeń, jednak w dalszym etapie rezystancja uzwojenia pierwotnego nabiera dużego znaczenia.

Podobnie jak w przypadku indukcyjności wartość rezystancji nie można dowolnie zmniejszać. Ograniczeniem jest tu maksymalna wartość prądu ze względu na trwałość elementu komutacyjnego oraz wytrzymałość cieplną cewki zapłonowej. Przyjmuje się, że wartość prądu  $i_1$  waha się w granicach 4,5 do 8 A. Zbyt duża wartość tego prądu może uszkodzić tranzystor w układach elektronicznych oraz samą cewkę zapłonową. W układach elektronicznych gdy prąd  $i_1$  osiągnie wartość maksymalną, wówczas jest ona regulowana (ograniczona) tak, aby wartość graniczna nie została przekroczona. Inną metodą ograniczenia prądu w uzwojeniu pierwotnym jest zmniejszenie prędkości zaniku prądu w obwodzie zwłaszcza przy niskich obrotach.

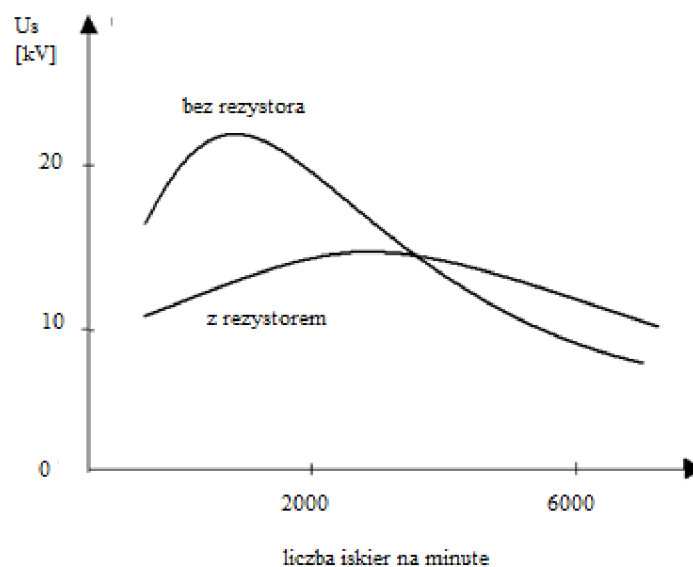
W produkowanych obecnie cewkach zapłonowych nie ma możliwości dynamicznej zmiany rezystancji  $R_1$  ani indukcyjności  $L_1$ . Stosowana jest jednak pośrednia metoda zmiany

rezystancji. Poprzez zastosowanie zewnętrznego opornika dodatkowego uzyskuje się zmianę rezystancji wypadkowej stosownie do wartości płynącego przez niego prądu. Opornik ten połączony jest w szereg z uzwojeniem pierwotnym cewki. Rezystancja tego opornika wykonanego ze stali lub niklu ulega dużej zmianie, pod wpływem temperatury, wskutek cieplnego działania prądu przez niego płynącego. Charakterystyki cewek zapłonowych z opornikiem i bez przedstawiono na rysunku 2.10.

Przy małych prędkościach obrotowych wału korbowego silnika, gdy czasy narastania prądu  $i_1$  są duże, wysoka skuteczna wartość prądu powoduje nagrzanie opornika dodatkowego. Powoduje to wzrost jego rezystancji co skutkuje ograniczeniem prądu  $i_1$  do wartości dopuszczalnej dla elementu komutacyjnego (krzywa  $R_1$  na rys. 2.9).

Przy większych prędkościach obrotowych wału korbowego, gdy czasy narastania prądu  $i_1$  maleją, zmniejsza się także skuteczna wartość prądu. Temperatura opornika dodatkowego maleje zmniejszając jego rezystancje. Wówczas sumaryczna wartość oporności obwodu pierwotnego cewki maleje. Powoduje to szybsze wzrastanie prądu w uzwojeniu pierwotnym  $i_1$ , najpierw po krzywej  $R_2$  a następnie  $R_3$  na rys. 2.9. Tym samym wzrasta wartość prądu ustalonego płynącego przez tranzystor.

Kolejnym parametrem mającym wpływ na wartość wysokiego napięcia jest przekładnia  $p$ , określająca stosunek liczby zwojów uzwojenia pierwotnego  $N_1$  do uzwojenia wtórnego  $N_2$ . Poprzez zwiększenie liczby zwojów uzwojenia wtórnego możemy zmniejszyć stosunek  $\frac{N_1}{N_2}$ , co spowoduje wzrost napięcia wtórnego  $U_{smax}$ . Jednak prowadzi to do zwiększenia spadku napięcia przy bocznikowaniu przerwy iskrowej.



Rys. 2.10. Charakterystyki cewek zapłonowych z opornikiem i bez opornika [32]

Podwyższenie przekładni, przez zwiększenie liczby zwoi uzwojenia wtórnego, powoduje wzrost pojemności  $C_1^*$  opisaną zależnością (2.5).

Powoduje to również, zmniejszenie częstotliwości  $f_0$  opisaną zależnością (2.4.) oraz wydłużenie czasu narastania napięcia. Skutkuje to zwiększeniem strat energii w rezystancji bocznikującej. Jednocześnie wzrasta pojemność własna cewki bo rośnie  $C_2$ , co dodatkowo zwiększa wartość  $C_1^*$  opisaną zależnością (2.5).

## 2.5. Metody zmiany indukcyjności i rezystancji cewki

W powszechnie stosowanych cewkach występują duże straty w uzwojeniach oraz rdzeniu. Ich wpływ na energię zapłonu potęguje wysoka temperatura przy dużej prędkości obrotowej wału korbowego. Indukcyjność rozproszenia konwencjonalnej cewki powoduje zmniejszenie szybkości narastania wysokiego napięcia. Cewka taka posiada typowe wady układów zapłonowych z gromadzeniem energii w indukcyjności. Energia iskry nie zawsze jest wysoka i na stałym poziomie. Poprawę własności cewki zapłonowej można osiągnąć poprzez zmianę parametrów cewki.

Indukcyjność własna jest to zdolność cewki do wytworzenia w zwojach napięcia na skutek oddziaływania zmiennych pól magnetycznych, powstających w wyniku przepływu prądu zmiennego. Dla przewodu indukcyjność przyjmuje następującą postać [41]

$$L = 0,002 \cdot l \cdot \left( \ln \frac{4l}{d} - x \right) \cdot \mu H \cdot \zeta \quad (2.16)$$

$l$  - długość przewodu [ $10^{-2}$ m],

$d$  - średnica przewodu [ $10^{-2}$ m],

$x$  - współczynnik, określający zależność indukcyjności od częstotliwości prądu i kształtu przewodu.

Prosty drut i wysoka częstotliwość oznacza  $x=1$ , dla niskiej częstotliwości  $x=0,75$ . W przypadku zgiętego drutu, indukcyjność zmaleje. Dla kręgu jednozwojowego  $x=2,45$  przy częstotliwościach wysokich i 2,20 przy niskich [41].

Zwiększenie indukcyjności przewodu można osiągnąć poprzez nawinięcie przewodu spiralnie, mimo że zgięcie przewodu powoduje zmniejszenie indukcyjności, to dominuje tu efekt wzajemnego oddziaływania zwojów, czyli indukcyjność wzajemna zwojów. Drugim sposobem na zwiększenie indukcyjności jest otoczenie przewodu materiałem magnetycznym

np. ferrytem lub stalą. Ponadto indukcyjność cewki wzrasta proporcjonalnie do kwadratu liczby zwojów w cewce.

Dla indukcyjności cewki powietrznej wielowarstwowej wzór na indukcyjność przybiera postać [41]:

$$L Z \frac{r^2 z^2}{9r H10l}, \quad (2.17)$$

$r$  – promień zwoju,

$z$  - liczba zwojów,

$l$  – długość.

Indukcyjność zależna jest od długości i przekroju przewodu oraz od geometrii cewki i przenikalności magnetycznej ośrodka otaczającego cewkę. Poprzez wprowadzenie do wnętrza cewki, rdzenia ze sproszkowanego żelaza można zmieniać indukcyjność cewki.

We wzorze dla cewki z rdzeniem dochodzą przenikalności magnetyczne [30, 38,40]:

$$L Z \frac{\mu_o \mu_r z^2}{\sum \frac{I_e}{A_e}}, \quad (2.18)$$

$\mu_o$  - przenikalność w próżni;

$\mu_r$  - przenikalność względna w stosunku do  $\mu_o$ ,

$I_e$  - długość cewki,

$A_e$  - powierzchnia przekroju cewki.

W celu poprawy właściwości indukcyjnych stosuje się rdzeń z materiału ferromagnetycznego. Najczęściej używane są do tego celu ferryty. Należą one do tzw. miękkich materiałów magnetycznych, tzn. że w chwili zaniku pola elektromagnetycznego zanika duża część ich strumienia magnetycznego. Przeciwnieństwem są twarde materiały magnetyczne, tzn. takie, które stosuje się np. na magnesy stałe. Ferryt jest ceramicznym, mikrokrystalicznym materiałem, składającym się z kryształków tlenku żelaza ( $Fe_2O_3$ ) oraz domieszek metali. Najczęściej spotykanymi kombinacjami jest mangan-cynk (MnZn) i nikiel-cynk (NiZn).

Ferryty posiadają bardzo wysoką przenikalność, niskie straty i mogą pracować z wysokimi częstotliwościami. Wadą ich jest niska indukcja nasycenia ( $B_s < 0,5T$ ), co skutkuje tym, że bardzo łatwo się nasycają zwłaszcza przy dużych składowych stałych prądu. Metodą zapobiegawczą jest używanie rdzeni ferrytowych z otwartym obwodem magnetycznym na

przykład w postaci pręta lub szczeliny powietrznej. Pręty mają otwarty obwód magnetyczny co powoduje, że przez cewkę mogą płynąć duże prądy bez nasycenia rdzenia.

Wartość indukcyjności w takim przypadku można obliczyć ze wzoru 2.19.:

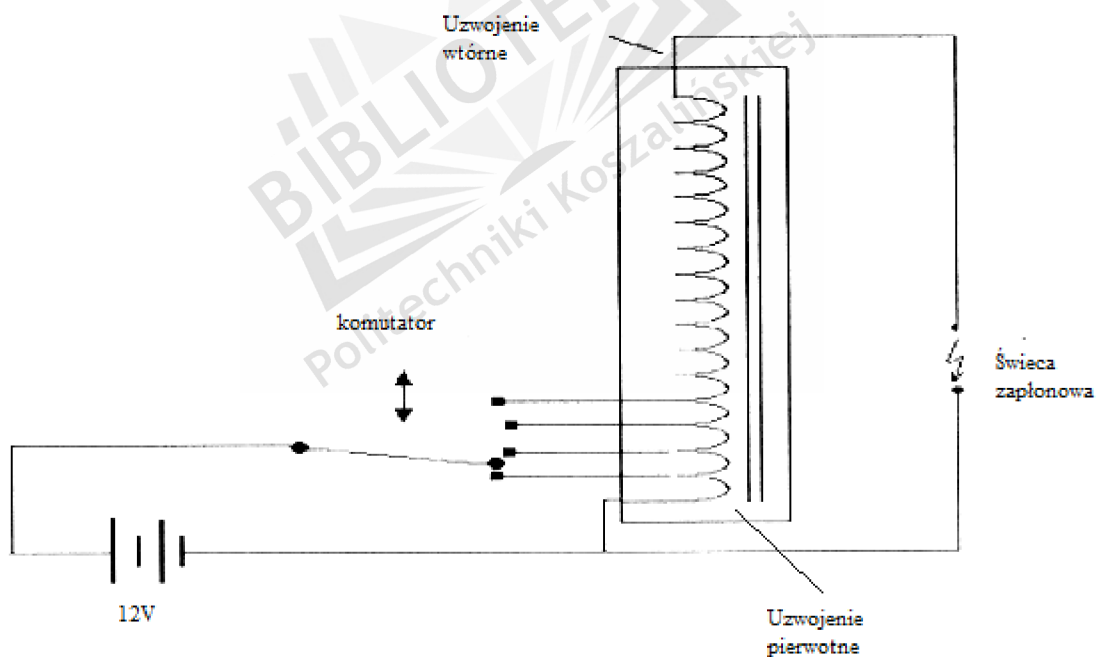
$$L = Z \frac{\pi}{4} \mu \frac{z^2 d}{l}, \quad (2.19)$$

$\mu$  - przenikalność magnetyczna,

$d$  – średnica cewki,

$l$  – długość cewki.

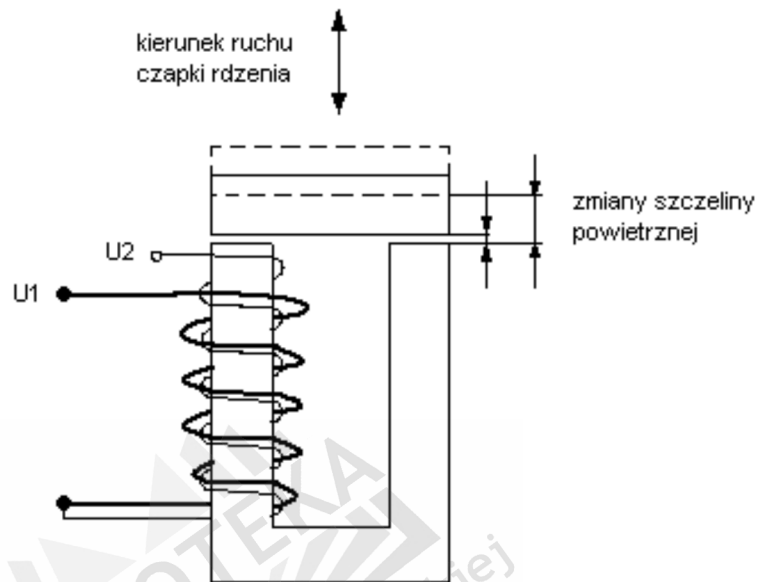
Analizując powyższy wzór można stwierdzić, że zmieniając poszczególne elementy wzoru można wpłynąć na wartość indukcyjności w cewce. Regulując liczbę zwojów cewki poprzez wykonanie odczepów zmieniamy wartość rezystancji oraz prądu w uzwojeniu pierwotnym cewki, zmienia się długość  $l$ , co przekłada się na zmiany indukcyjności cewki – rys.2.11.



Rys.2.11. Cewka zapłonowa z odczepami [71,72]

Prąd wzbudzający cewki można także regulować przez nastawialną szczelinę powietrzną w rdzeniu co pokazano na rys. 2.12.

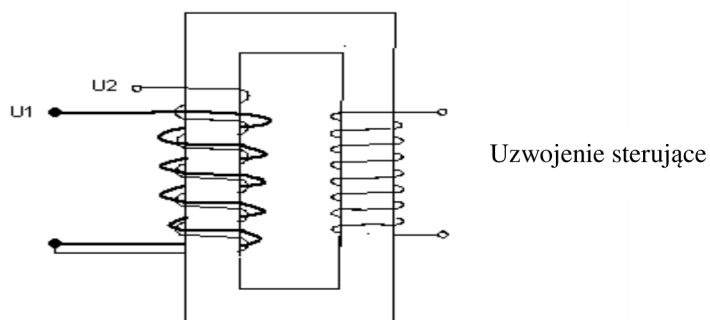
Oddalając lub przybliżając elementy rdzenia zmieniamy szczelinę powietrzną obwodu magnetycznego, tym samym wpływając na wartość przenikalności magnetycznej.



Rys.2.12. Cewka zapłonowa z nastawialną szczeliną powietrzną

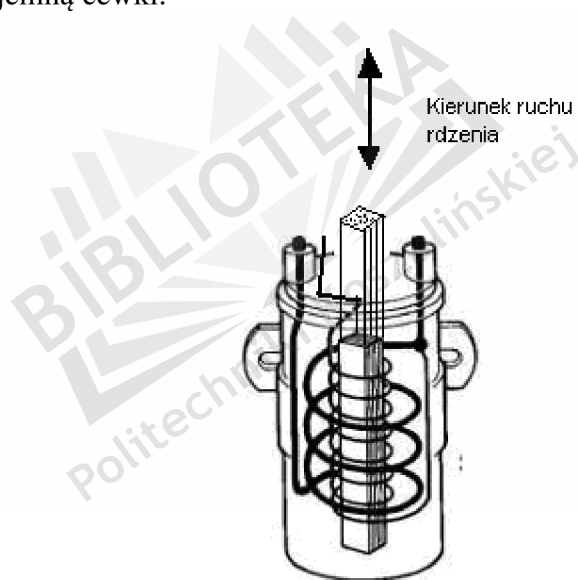
Kolejnym sposobem zmiany indukcyjności cewki jest metoda zmiany stopnia nasycenia rdzenia magnetycznego. Polega ona na umieszczeniu na rdzeniu dodatkowego uzwojenia tzw. sterującego. Uzwojenie robocze  $N_1$  reprezentuje regulowaną nieliniową impedancję. Natomiast uzwojenie sterujące ma za zadanie podmagnesowanie rdzenia prądem stałym. Skutkiem podmagnesowania stali jest zmiana reluktancji stali. Gdy prąd sterujący rośnie, rdzeń staje się bardziej nasycony i wzrasta jego reluktancja.

Zwiększenie reluktancji obwodu magnetycznego objawia się spadkiem impedancji uzwojenia roboczego. Podsumowując, zwiększanie prądu uzwojenia sterującego działa korzystnie na uzwojenie robocze, powodując zwiększenie płynącego w nim prądu.



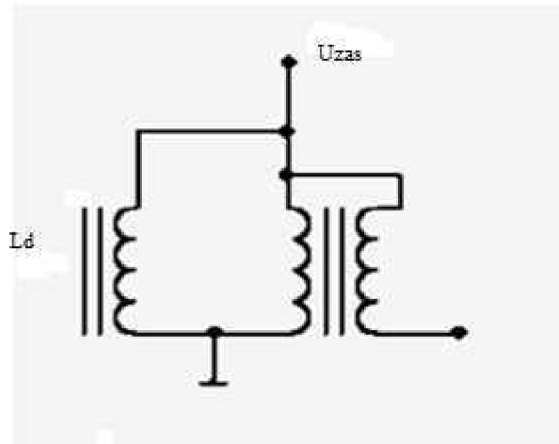
Rys.2.13. Cewka zapłonowa ze zmianą stopnia nasycenia rdzenia magnetycznego [32]

Zmianę indukcyjności można także osiągnąć przy użyciu ruchomego rdzenia cewki zapłonowej. Przesunięcie rdzenia powoduje zmianę strumienia magnetycznego skojarzonego z cewką co zmienia przenikalność magnetyczną wzdłuż drogi strumienia, a więc i indukcyjność wzajemną cewki.



Rys.2.14. Cewka zapłonowa z ruchomym rdzeniem

Zwiększenie energii iskry można także osiągnąć poprzez dołączenie pomocniczej indukcyjności  $L_d$ , równoległe do uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej .



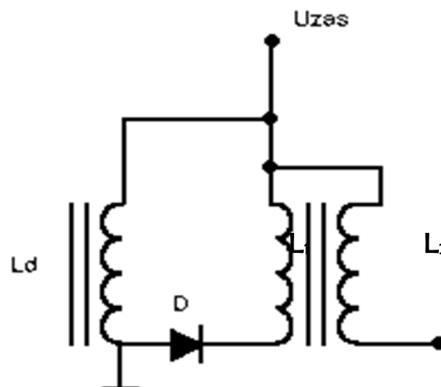
Rys.2.15. Układ z pomocniczą indukcyjnością [2]

Zgodnie z rysunkiem 2.15, prąd płynący w obwodzie dzieli się na dwie części. Jedna płynie przez uzwojenie pomocnicze  $L_d$ , a druga przez uzwojenie pierwotne  $L_1$ .

W konsekwencji uzyskuje się zmniejszenie prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne, co powoduje obniżenie temperatury uzwojeń cewki i zmniejszenie strat energii.

Całkowita energia iskry na świecy wynika głównie z indukcyjności wypadkowej, dlatego dobierając cewkę pomocniczą  $L_d$  o dużej indukcyjności istnieje możliwość użycia cewki  $L_1$  o mniejszych rozmiarach, a więc o zmniejszonej indukcyjności rozproszenia  $L_r$  i pojemności własnej. Skutkuje to zwiększeniem częstotliwości oscylacji napięcia  $U_s$  w obwodzie świecy co prowadzi do jego szybszego narastania.

Celem zwiększenia stromości narastania wysokiego napięcia należy oddzielić funkcję magazynowania energii od funkcji podnoszenia napięcia. Można to zrealizować w sposób przedstawiony na rysunku 2.16.



Rys.2.16. Układ z pomocniczą indukcyjnością i diodą D [2]



Włączona dodatkowo w obwód dioda  $D$  ma powodować, że po zwarciu przerywacza prąd o dużym natężeniu będzie płynął tylko przez indukcyjność dodatkową  $L_d$ . Używając cewki o bardzo małej indukcyjności rozproszenia otrzymujemy impulsy wysokiego napięcia o szybkości narastania podobnej do uzyskiwanej w kondensatorowym układzie zapłonowym. Podsumowując, rezystancja wewnętrzna tego układu jest znacznie mniejsza niż w przypadku tradycyjnego układu zapłonowego.

## 2.6. Modyfikacje układów zapłonowych opisane w literaturze

W literaturze motoryzacyjnej niewiele jest materiałów na temat rozwiązań technicznych dotyczących sterowania energią w układzie zapłonowym. W pracy [17] opisano badania eksploatacyjne przeprowadzone na pojazdach testowych wyposażonych w klasyczny układ zapłonowy o parametrach fabrycznych oraz układ zapłonowy o zwiększonej energii wyładowania iskrowego. Energia wyładowania została zwiększona ok. 10- cio krotnie. Zwiększenie energii uzyskano poprzez stabilizację napięcia ładowania kondensatora przerywacza zapłonu, gdyż jak wiadomo zmniejsza się ono ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Ponadto zwiększono przerwę na świecach zapłonowych. Stwierdzono ponadto, że silnik pracuje równomiernie przy zwiększonych statycznych kątach wyprzedzenia zapłonu. Zmieniało go od nastawy fabrycznej tj.  $7^\circ$  do  $25^\circ$ . Przy zwiększonym kącie silnik pracował poprawnie. W czasie badań eksploatacyjnych stwierdzono zwiększenie własności dynamicznych samochodu (większe przyspieszenia, rzędu 10%) oraz zmniejszone zużycie paliwa – rzędu 6,2% w stosunku do układu fabrycznego dla kąta wyprzedzenia zapłonu  $18^\circ$ , lecz dla kąta  $25^\circ$  zużycie paliwa wzrosło dla prędkości samochodu średnich i wysokich. Ponadto dla większego kąta zmalała dynamika jazdy.

W pracy [66] przeprowadzono analizę pracy klasycznych układów zapłonowych. Wskazano wady i zalety układów stykowych. Na tej podstawie autor przedstawił koncepcję układu zapłonowego zmierzającą do poprawy dynamiki jazdy. Koncepcja układu opiera się na analizie procesu gromadzenia energii w cewce zapłonowej. W przypadku konkretnej konstrukcji cewki zapłonowej parametry cewki określone są wzorami:

$$L_1 \approx \alpha_L z_1^2, \quad (2.20)$$

$$R_1 \approx \alpha_R z_1^2, \quad (2.21)$$

gdzie:  $\sim_R, \sim_L$  oznaczają współczynniki proporcjonalności rezystancji i indukcyjności uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej.

$$\text{Stała czasowa uzwojenia wynosi: } \tau = \frac{L_1}{R_1} Z \frac{\alpha_L}{\alpha_R} = \text{const.} \quad (2.22)$$

$$\text{Energia zgromadzona w stanie ustalonym wynosi: } E_1 Z \frac{U_0}{2} \frac{\alpha_L}{\alpha_R} I_1. \quad (2.23)$$

Z wyrażenia powyższego wynika, iż energia w stanie ustalonym, wraz ze wzrostem prądu narasta. Istnieje możliwość oddziaływania na parametry cewki zapłonowej poprzez zmianę objętości uzwojeń. W tym przypadku ze wzrostem objętości uzwojenia pierwotnego maleje  $\alpha_R$ ,  $\alpha_L$ . pozostaje stały a równocześnie wzrasta indukcyjność rozproszenia  $L_R$ . Istnieje pewna optymalna wartość objętości uzwojenia dla uzyskania odpowiedniej stromości narastania napięcia w uzwojeniu wtórnym. Ostatecznie energia zawarta w cewce wynosi:

$$E_1 Z \alpha_E I_1 \left( 1 - e^{-\frac{\alpha t}{\tau}} \right)^2, \quad (2.24)$$

$$\text{gdzie: } \alpha_E Z \frac{U}{2} \frac{\alpha_L}{\alpha_R}, \quad (2.25)$$

czas niezbędny do poprawnej pracy układu zapłonowego, związany z gromadzeniem odpowiedniej energii ( $E_1 = E_p$ ) w czasie narastania napięcia wtórnego wynosi:

$$t_p Z \frac{1}{\alpha_E} \ln \left( \sqrt{\frac{E_p}{\alpha_E}} \left( \frac{1}{\sqrt{I_1}} \right) \right), \quad (2.26)$$

co odpowiada obrotom maksymalnym wału korbowego, przy których energia zmagazynowana w cewce jest wystarczająca do stabilnej pracy układu zapłonowego wynosi:

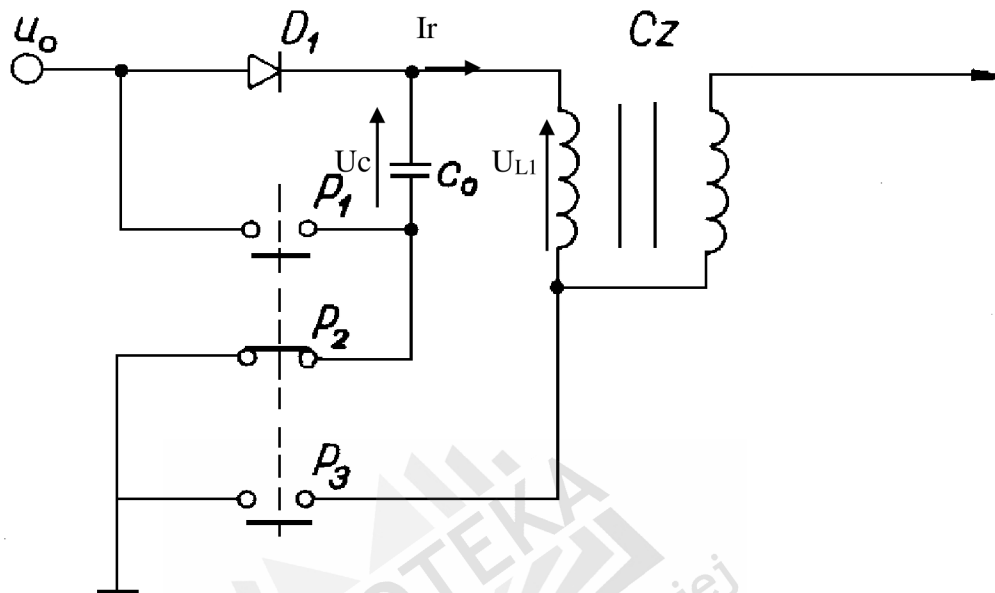
$$n_{\max} Z \frac{1}{\alpha_t} \ln \left( 1 - \sqrt{\frac{E_p}{\alpha_E}} \left( \frac{1}{\sqrt{I_1}} \right) \right), \quad (2.27)$$

gdzie:  $\alpha_t$  jest współczynnikiem zależnym od liczby cylindrów i kąta zwarcia.

Z powyższego wzoru wynika, iż przy niewielkim wzroście obrotów potrzeba jest znacznego prądu w stanie ustalonym. Trzykrotne skrócenie czasu zwarcia wymaga dziewięciokrotnego wzrostu prądu. Ze względu jednak na złożony proces zapłonu mieszanki, należy traktować go

jako pewne prawdopodobieństwo zapłonu i podane zależności czasu i prądu można traktować jako prawdopodobieństwo dla konkretnych warunków technicznych.

Koncepcję realizującą układ zapłonowy o zwiększonej energii wyładowania iskrowego przedstawiono na rysunku 2.17.:



Rys.2.17. Schemat koncepcji układu z przyspieszonym gromadzeniem energii w cewce[66]

W przedstawionym układzie przebieg prądu ma postać:  $I_r = Z I_1 \sin \omega t$ .

Napięcia na kondensatorze:  $U_c = Z U \sqrt{2} \cos \omega t \sin \omega t$ . (2.28)

Napięcie na indukcyjności:  $U_{L1} = Z 2U \cos \omega t$ . (2.29)

Uproszczony schemat obwodu pierwotnego, dla P1 zwarte, przedstawia się następująco:



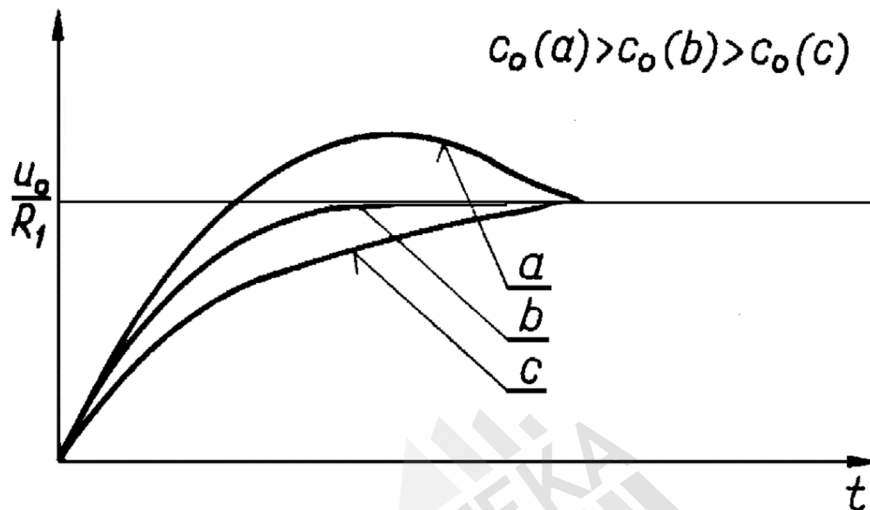
Rys.2.18. Schemat obwodu pierwotnego z pominięciem rezystancji uzwojeń [66]

W przedstawionym obwodzie mogą zaistnieć przypadki:

a)  $I_1 > \frac{U}{R_1}$     b)  $I_1 = \frac{U}{R_1}$     c)  $I_1 < \frac{U}{R_1}$ . (2.30)

Powyższe przypadki przedstawia rysunek 2.20.

W przypadku b) energia zgromadzona w cewce zapłonowej równa jest energii w stanie ustalonym. Oznacza to uniezależnienie energii zmagazynowanej od obrotów silnika.



Rys.2.19. Przebieg prądu w pierwotnym uzwojeniu cewki zapłonowej dla różnych pojemności [66]

W tym celu muszą zostać spełnione warunki:  $I_1 Z \geq 2 \frac{U}{R_1}$  z czego wynika pojemność

kondensatora:

$$C \geq \frac{L_1}{R_1^2}, \quad (2.31)$$

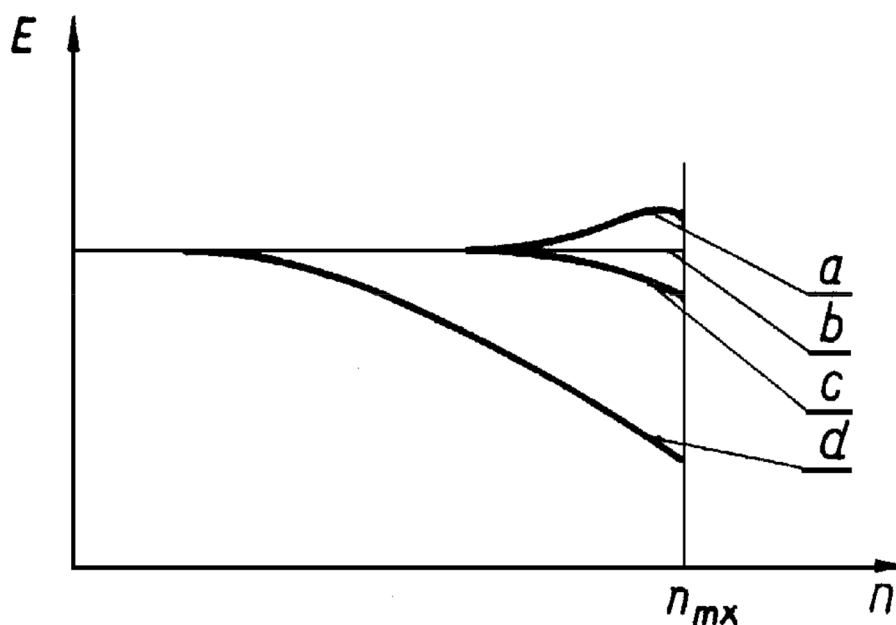
gdzie : pominięto współczynnik tłumienia obwodu.

Porównując czasy osiągnięcia stanu ustalonego przebiegu wykładniczego przebiegu prądu

i przebiegu oscylacyjnego, otrzymano:

$$t_z \geq 2,3 \tau_1 \text{ oraz } t_z \geq \frac{\pi}{4} \frac{L_1}{R_1}. \quad (2.32)$$

Z zależności tych wynika, iż czas osiągania maksymalnych energii w zapłonie usprawnionym maleje trzykrotnie. Zależności te przedstawiono na rysunku 2.20.:

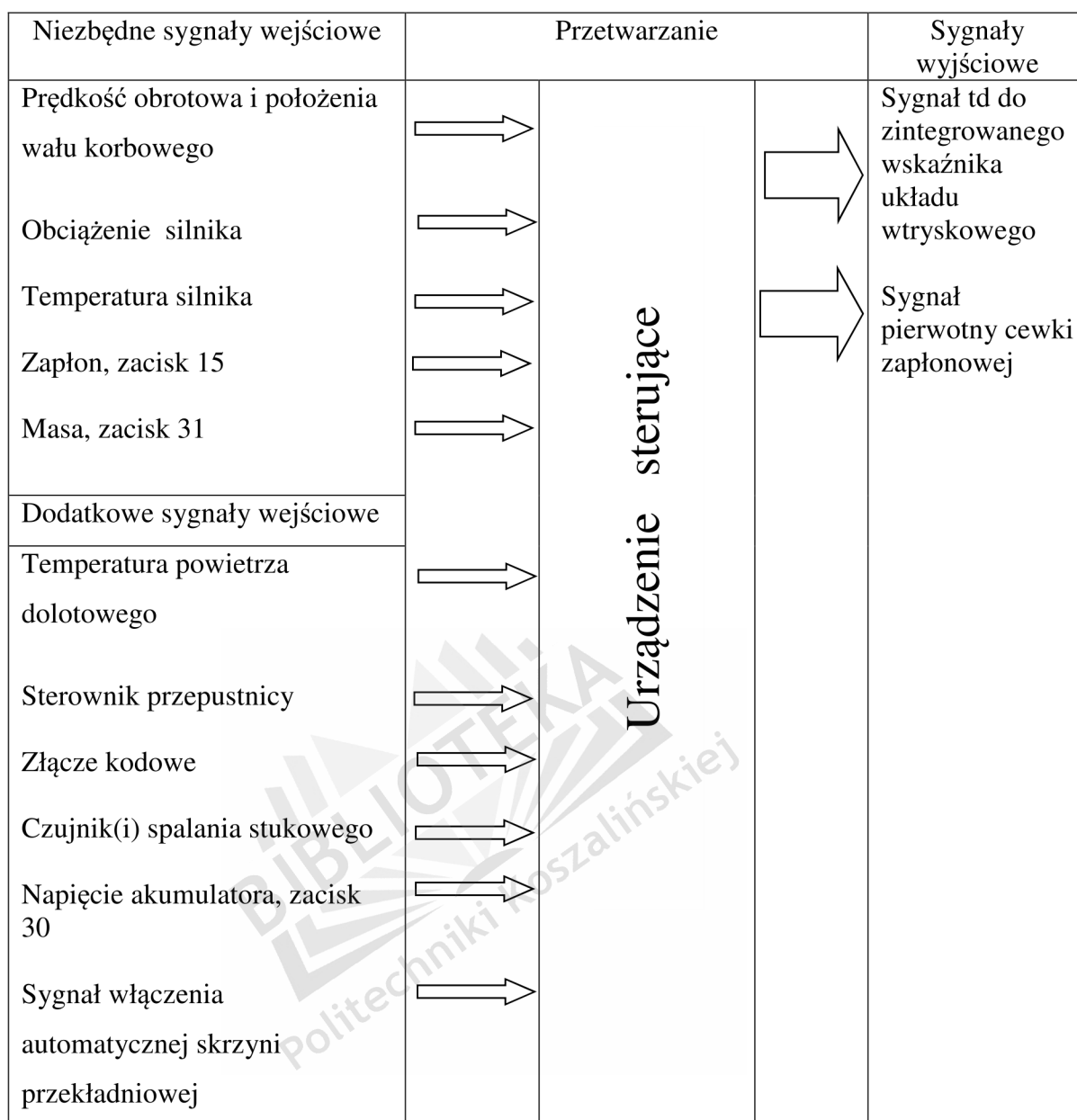


Rys.2.20. Przebieg energii nagromadzonej w cewce zapłonowej w zależności od obrotów wału korbowego silnika ( krzywa d – układ konwencjonalny, krzywa a, b, c – układ usprawniony) [66]

Układ z przyspieszonym gromadzeniem energii w cewce może być realizowany jako elektroniczny. Koncepcje układów przedstawiono w pozycji [66] z przerwaczem mechanicznym lub kluczem tranzystorowym.

W pozycjach: [4,19,21,22,23,26,39,49,50,51,58,64] opisano współczesne układy wtryskowe i wtryskowo zapłonowe. Są to układy sterowane mikroprocesorowo. W układach wtryskowo zapłonowych układ zapłonowy wchodzi w skład głównego urządzenia sterującego. W układach tych są sygnały wejściowe wykorzystywane są do sterowania wtryskiem benzyny i układem zapłonowym oraz podzespołami podwozia i innymi urządzeniami samochodu.

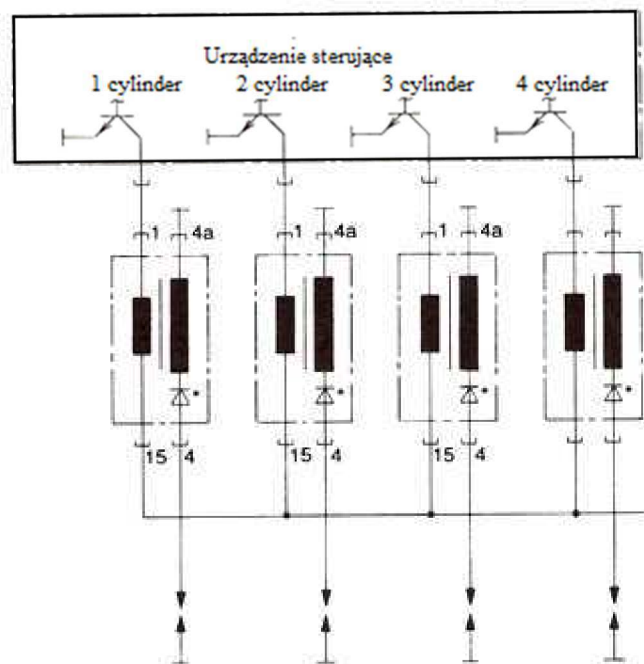
Do poprawnego działania układu zapłonowego mikroprocesorowego wymagane są sygnały wejściowe przedstawione na rys. 2.21. Oprócz sygnałów podstawowych mogą występować sygnały dodatkowe.



Rys.2.21. Sygnały wejściowe i wyjściowe mikroprocesorowego układu zapłonowego [26,51]

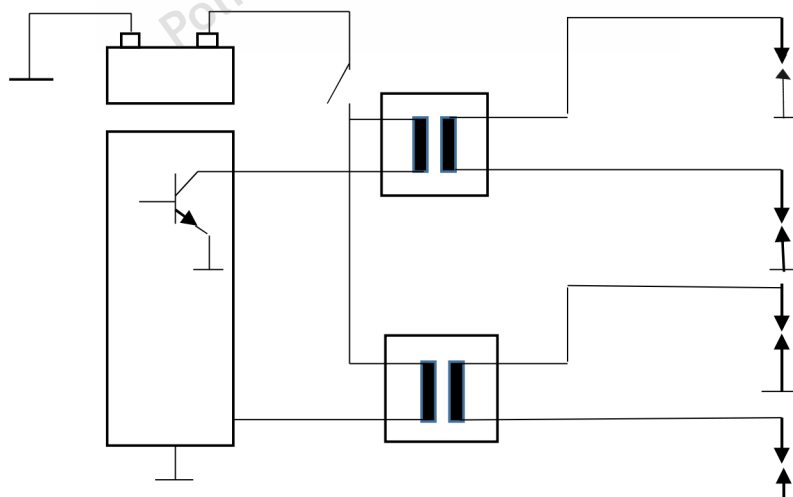
Sygnały wejściowe są wielkościami służącymi do określania parametrów pracy urządzeń wykonawczych.

Przykłady sterowania cewkami zapłonowymi w mikroprocesorowych układach zapłonowych:



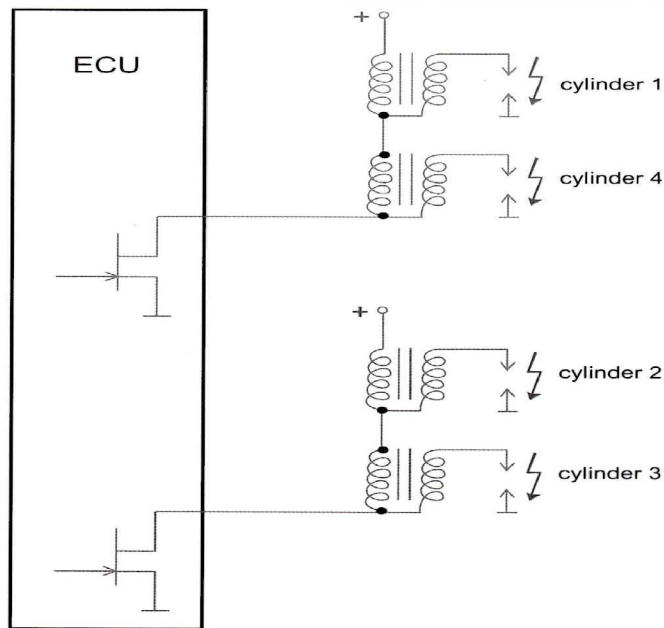
Rys.2.22. Cewki zapłonowe sterowane tranzystorami bipolarnymi [49]

Na rysunku 2.22 przedstawiono cewki zapłonowe sterowane za pośrednictwem mikroprocesorowego urządzenia sterującego. Stopnie końcowe sterujące uzwojeniem pierwotnym cewek wykorzystują tranzystory bipolarne typu NPN. Układy takie posiadają tzw. cewki indywidualne tj. po jednej na każdy cylinder silnika. W obudowie cewek znajduje się układ elektroniczny przeciwprzepięciowy w postaci diod półprzewodnikowych.



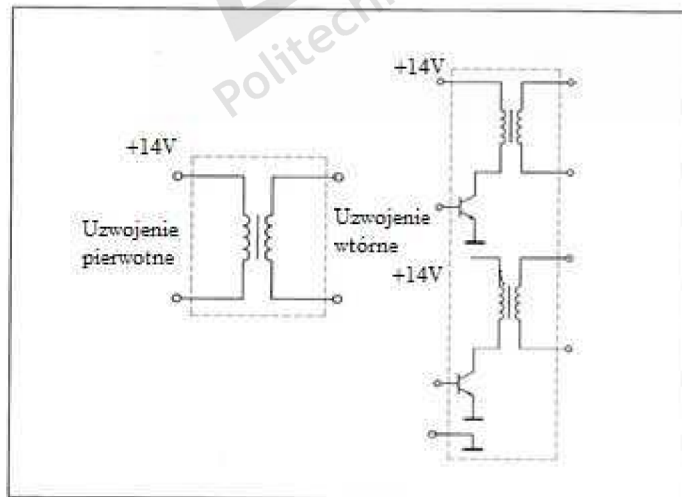
Rys.2.23. Mikroprocesorowy układ zapłonowy z cewkami dwuiskrowymi [21]

Układ przedstawiony na rysunku 2.23 wykorzystuje cewki dwuiskrowe. Iskra zapłonowa przeskakuje w dwu cylindrach jednocześnie. Zapłon mieszanki odbywa się tylko w cylindrze, w którym odbywa się sprężanie mieszanki paliwowo powietrznej.



Rys.2.24. Mikroprocesorowy układ zapłonowy z cewkami zapłonowymi tak zwanymi „sześciowoltowymi”[21]

Układ zapłonowy przedstawiony na rysunku 2.24 charakteryzuje się stopniami końcowymi wykonanymi w technologii FET. Jego cechą szczególną jest szeregowe połączenie uzwojeń pierwotnych dwu cewek zapłonowych szeregowo. W ten sposób utworzono dzielnik napięcia. Sterowanie takie zastosowała firma Renault.



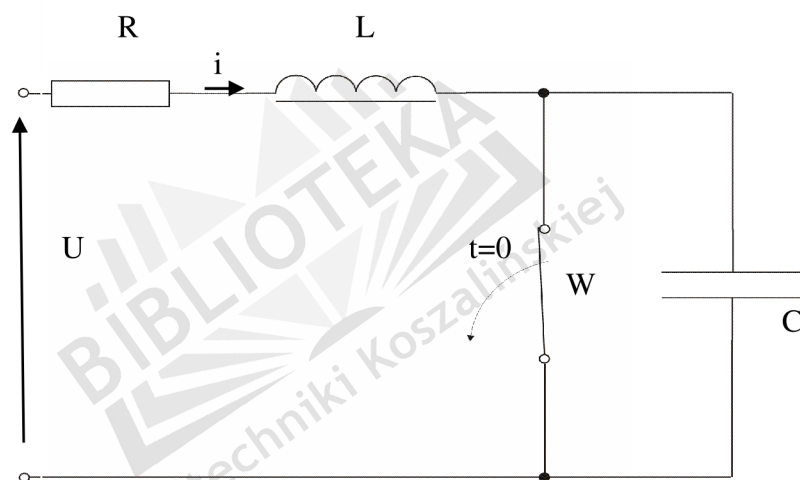
Rys.2.25. Cewki zapłonowe dwuskrone montowane w jednej obudowie [21]



### 3. ANALIZA STANÓW PRACY UKŁADU ZAPŁONOWEGO

Układ zapłonowy pracuje w dwóch stanach elektrycznych, przy zwartym i rozwartym obwodzie pierwotnym. Jego działanie można przedstawić za pomocą elektrycznych schematów zastępczych, (model matematyczny). Poniżej przedstawiono analizę pracy układu zapłonowego po stronie pierwotnej w aspekcie stanów nieustalonych. Schematy zastępcze zbudowane elementów opisujących obwód pierwotny w trakcie komutacji. We współcześnie stosowanych układach zapłonowych stosuje się sterowanie elektroniczne, lecz zjawiska w nich zachodzące mają charakter uniwersalny niezależnie od rodzaju układu zapłonowego, mechanicznego czy elektronicznego.

#### 3.1. Działanie układu w fazie narastania i zaniku prądu w uzwojeniu pierwotnym



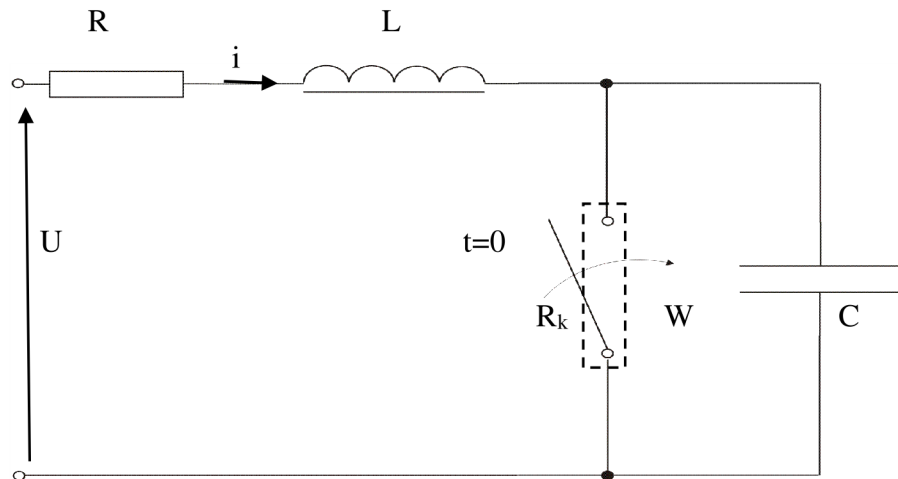
Rys. 3.1. Schemat zastępczy obwodu pierwotnego zapłonu w chwili rozwierania komutatora W

Równanie ogólne obwodu  $RLC$  dla tej fazy zapłonu:

$$U - ZL \frac{di}{dt} - HRi - \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \quad t > 0, \quad (3.1)$$

- gdzie:
- $L$  indukcyjność obwodu pierwotnego,
  - $R$  rezystancja obwodu pierwotnego, w skład której wchodzi rezystancje elementów z których zbudowany jest obwód,
  - $i$  wartość chwilowa prądu,
  - $C$  pojemność obwodu pierwotnego.

**Działanie układu w chwili zwiarcia obwodu pierwotnego:**



Rys. 3.2 Schemat zastępczy obwodu pierwotnego zapłonu w chwili zwiarcia komutatora W

Równanie ogólne obwodu dla fazy zwarcia obwodu pierwotnego zapłonu:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U \quad t > 0. \quad (3.2)$$

W zależności od stanu energetycznego pojemności elektrycznej obwodu pierwotnego w świetle powyższych badań wartość wymuszenia stałego  $U = \text{const}$ .

**3.2. Stany nieustalone w obwodzie RLC o wymuszeniu stałym**

W czasie rozwarcia komutatora W, w obwodzie pierwotnym (rys.3.1), słuszne jest równanie dla szeregowego połączenia elementów RLC.

Drugie prawo Kirchhoffa dla obwodu ma postać:

$$u_L + u_R + u_C = U, \quad (3.3)$$

gdzie:  $U$  – napięcie zasilające.

Równanie różniczkowe opisujące ten stan jest postaci:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U, \quad t > 0. \quad (3.4)$$

Uwzględniając: 
$$i = C \frac{du_c}{dt}, \quad (3.5)$$

otrzymuje się:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} = H u_c \quad Z U. \quad (3.6)$$

Zakłada się następujące warunki początkowe:

$$i(0) = k \frac{U}{R} \quad \text{dla} \quad 0 < k < 1, \quad (3.7)$$

$$k \geq \frac{I_k}{I_u}; I_u \geq \frac{U}{R}; I_k \leq I_u \left( 1 + e^{-\frac{t_z}{\tau}} \right),$$

gdzie:  $I_k$ : wartość prądu w momencie rozwarcia komutatora,

$I_u$ : wartość ustalona prądu,

$t_z$ : czas zwarcia,

$\tau$ : stała czasowa,

$u_c(0) = U_0$  niezerowe napięcie resztkowe na pojemności przy niecałkowitym rozładowaniu.

Ze wzorów (3.5) i (3.7), uzyskuje się:

$$\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{C} i(0) = k \frac{U}{RC}. \quad (3.8)$$

Rozwiązanie równania (3.6) ma postać [57][34]:

$$u_c = Z U H A e^{s_1 t} + H B e^{s_2 t}, \quad (3.9)$$

gdzie:  $s_1 = -\alpha + j\omega_0$ ;  $s_2 = -\alpha - j\omega_0$ ,

$$\alpha = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2}.$$

Postać rozwiązania (3.9) odnosi się do przypadku, gdy rezystancja krytyczna:  $R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ,

jest większa od rezystancji obwodu  $R$ , ( $R_k > R$ ).

Ze wzorów : (3.7) (3.8) (3.9) otrzymuje się układ równań:

$$\begin{cases} AHBZU_0 \vartheta U \\ A_{s_1} HB_{s_2} Z \frac{kU}{RC} \end{cases}$$

Rozwiązując powyższy układ i wstawiając stałe A i B do wzoru (3.9), uzyskuje się:

$$u_c Z U H e^{\vartheta at} \left\{ \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} \left[ \frac{kU}{RC} \vartheta a H Z U_0 \right] \vartheta U E \vartheta U_0 \cos \omega_0 t \right\}. \quad (3.10)$$

Ze wzorów (3.5) i (3.10), otrzymuje się:

$$i Z C e^{\vartheta at} \left\{ \sin \omega_0 t \left[ H Z U_0 \frac{1}{\omega_0 LC} \vartheta \frac{akU}{\omega_0 RC} \right] H \frac{kU}{RC} \cos \omega_0 t \right\}. \quad (11.3)$$

Celem określenia przebiegu prądu  $i(t)$  w chwili  $t=0$  (monotoniczność przebiegu) wyznacza

się pochodną  $\frac{di}{dt}$  :

$$\frac{di}{dt} Z e^{\vartheta at} \left\{ \sin \omega_0 t \left[ \vartheta \frac{a}{\omega_0 L} H Z U_0 \frac{kU}{R} \frac{a^2 \vartheta \omega_0^2}{\omega_0} \right] H \cos \omega_0 t \frac{U \vartheta kU \vartheta U_0}{L} \right\}. \quad (3.12)$$

Ze wzoru (3.12), otrzymuje się:

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} Z \frac{U H \vartheta k \vartheta U_0}{L}. \quad (3.13)$$

Dla uproszczenia zapisu wprowadza się oznaczenie:

$$i' H \vartheta \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0}.$$

Na podstawie zależności: (3.13) można wyróżnić następujące przypadki:

- 1°  $k=1$  ;  $U_0=0$  ;  $i'(0) = 0$ ,
- 2°  $U_0 = U(1-k)$  ;  $i'(0) = 0$ ,

3°  $k=1; U_0>0; i'(0)<0$ ,  
4°  $k<1; U_0=0; i'(0)>0$ .

Przypadek 1° odpowiada pojemności całkowicie rozładowanej ( $U_0=0$ ) oraz wartości prądu  $I_k=I_u$ , co oznacza  $t_z>5\tau$ .

Ujemna wartość pochodnej  $i'(0)$  oznacza, że prąd będzie zanikał, dodatnia, iż będzie narastał.

W przypadku 1 przebiegi prądu i napięcia na pojemności mają charakter oscylacyjny, tłumiony o pulsacji  $\omega_0$  i amplitudzie malejącej wykładniczo do zera.

### 3.3. Określenie charakteru obwodu zapłonu

W przypadku obwodu zapłonu (rys.3.1) mamy do czynienia z przypadkiem zasilania gałęzi szeregowej  $RLC$  napięciem stałym. Tak więc napięcie ustalone na pojemności dla prędkości obrotowej silnika  $n=0$  wynosi  $U_0=U, I_u=0$ .

W przypadku, gdy pojemność nie była uprzednio naładowana to:

$u_c(0) = -u_{cu}(0) = 0$  dla prędkości obrotowej  $n=0$ .

Podobnie jest z prądem obwodu pierwotnego.

$i(0) = i_p(0) = I_k$ ,

gdzie:  $I_k$  jest to wartość końcowa prądu pierwotnego właściwa dla danej prędkości obrotowej w chwili przzerwania obwodu pierwotnego tj. w chwili zmiany struktury obwodu.

Na podstawie tych warunków wyznaczamy stałe całkowania, dla przypadku obwodu oscylacyjnego na podstawie przyjętych parametrów:

rezystancja obwodu pierwotnego wynosi:  $R = 3,83\Omega$ ,

indukcyjność obwodu pierwotnego wynosi:  $L = 18\text{mH}$ ,

pojemność obwodu pierwotnego wynosi:  $C = 173,2\text{nF}$ .

Tak więc rezystancja krytyczna obwodu pierwotnego wynosi:  $R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 600\Omega$ .

Obwód ma charakter oscylacyjny ( $R_k > R$ ), co potwierdzają oscylogramy napięcia.

### 3.4. Rozładowanie pojemności w obwodzie pierwotnym

Po zwarceniu komutatora, pojemność rozładowuje się w obwodzie  $R_k C$  – rys. 3.2. Pozostała część obwodu zapłonu zmienia strukturę na obwód RL.

Rozładowanie pojemności przebiega zgodnie ze wzorem:

$$u_c = u_{cp} = U_0 e^{-t/R_k C}, \quad (3.14)$$

gdzie:  $U_0$  jest napięciem w chwili przełączenia,

$R_k$  jest rezystancją komutatora, niezależnie od jego rodzaju. W przypadku komutatora mechanicznego:  $R_k$  oznacza jego rezystancję (stykową), jeśli komutatorem jest tranzystor to jako  $R_k$  przyjmuje się jego rezystancję złączową.

Przy czym może zaistnieć sytuacja :  $U = U_0$ .

Przebieg prądu ma postać:  $i = Cduc/dt = (-U_0/R) e^{-t/RC}$ . (3.15)

Znak minus oznacza, iż przy rozładowaniu kondensatora prąd jest przeciwny do prądu ładowania.

Wskutek istnienia rezystancji skróśnej  $R_{iz}$  w obwodzie kondensatora następuje zjawisko samowyładowania pojemności  $C$ , w stanie rozłączonego komutatora W. W takim wypadku stała czasowa:

$$\tau = R_{iz}C = \varepsilon\rho = \varepsilon_0\varepsilon_r\rho, \quad (3.16)$$

gdzie:  $\varepsilon_r = 7$ : przenikalność względna,  $\rho = 2,3 \cdot 10^{10} \Omega m$ : rezystywność dielektryka,  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$ : przenikalność próżni.

W praktyce po ok. 3 minutach napięcie na kondensatorze utrzymuje się na poziomie : 37% wartości początkowej.

Rezystancja obwodu przzerwania zapłonu, w którym rozładowuje się kondensator osiąga wartości rzędu:  $R_p = 0,004 \Omega$ . Na jej wartość składają się: rezystancje połączeń, rezystancja zestykowa komutatora mechanicznego lub rezystancja złącza PN w wypadku komutatora elektronicznego.

Stała czasowa obwodu wynosi:  $\tau = R_p C = 0,004 \Omega \times 173,2 nF \sim 0,7 ms$ .

Teoretycznie pojemność powinna rozładować się całkowicie dla całego zakresu prędkości obrotowej, po zamknięciu obwodu pierwotnego. Jednak jak widać na oscylogramach napięcia [62,63], na pojemności zostaje napięcie szczątkowe. Jest to spowodowane malejącym czasem zwarcia obwodu pierwotnego zapłonu, w miarę wzrostu prędkości obrotowej.

### 3.5. Ładowanie pojemności w obwodzie pierwotnym

Równanie napięć dla tej części obwodu w chwili rozwarcia obwodu pierwotnego wynosi:

$$Ri + u_c = U - u_L. \quad (3.17)$$

Po podstawieniu wzoru (3.5) otrzymuje się:

$$R \frac{du_c}{dt} + u_c = U - u_L = U_p. \quad (3.18)$$

Uwzględniając ładunek początkowy pojemności  $Q_0$ , rozwiązanie równania (3.18) ma postać:

$$u_c = U_p - (U_p - \frac{Q_0}{C}) e^{\frac{-t}{RC}}, \quad (3.19)$$

oraz:

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{R} (U_p - \frac{Q_0}{C}) e^{\frac{-t}{RC}}. \quad (3.20)$$

### 3.6. Faza zwarcia obwodu pierwotnego

Po zwarciu komutatora  $W$ , obwód zapłonu po stronie pierwotnej zmienia swoją strukturę na  $RL$ .

Traktując obwód jako liniowy można traktować stan nieustalony jako superpozycję odpowiedzi wymuszonej i swobodnej obwodu na dane wymuszenie.

W wypadku uwzględnienia nieliniowości uzwojenia pierwotnego, należy zastosować jedną metod przybliżonych:

- metodę jednocinkowej linearyzacji charakterystyki nieliniowej, gdzie:

$$\Psi = L_{st} i,$$

$\Psi$  – jest to strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem  $L$ ,

$L_{st}$  – jest indukcyjność w stanie nasycenia.

Równanie obwodu:  $\frac{d\Psi}{dt} + Ri = RI_\infty$ .

Przebieg strumienia:

$$\Psi = \Psi_\infty (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}), \quad (3.21)$$

gdzie:  $\Psi_\infty$  - strumień magnetyczny skojarzony prądem ustalonym.

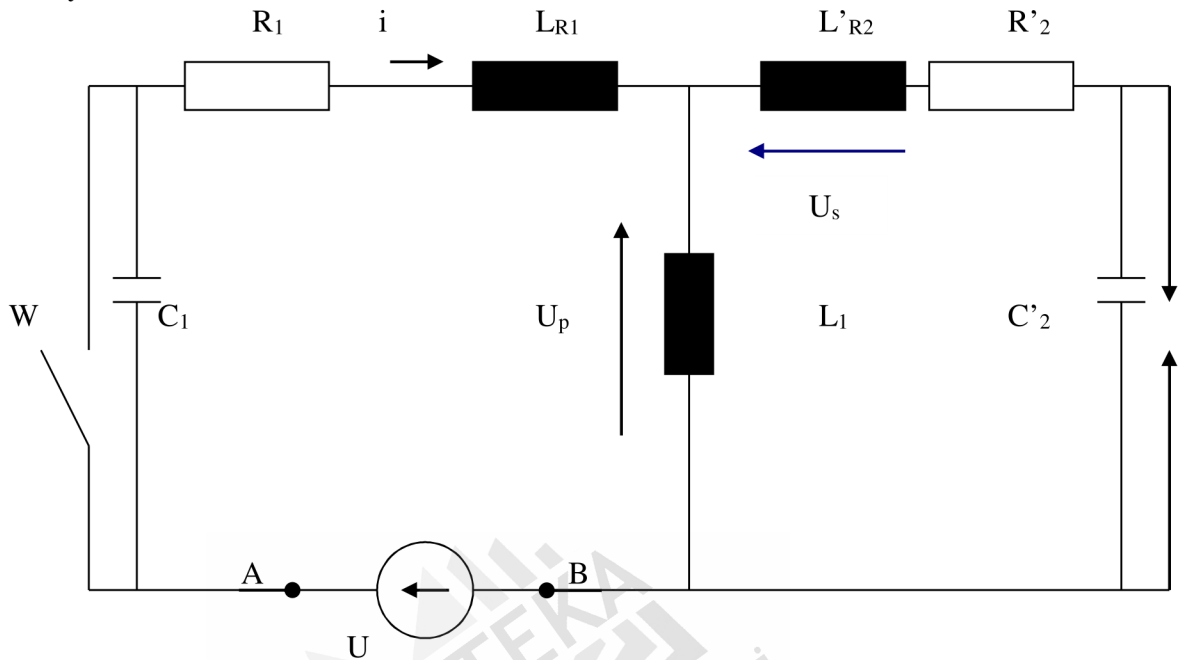
Stała czasowa:

$$\tau = \frac{L_{st}}{R}.$$

Przebieg prądu otrzymuje się z charakterystyki graficznej strumienia  $\Psi$ .

### 3.7. Analiza schematów zastępczych układu zapłonowego

Poniżej przedstawiono analizę pracy całości układu zapłonowego, tj. stronę pierwotną i wtórną układu.



Rys.3.3. Schemat zastępczy układu zapłonowego [56] [60]

gdzie:  $U$  - napięcie zasilania,  
 $C_1$  - pojemność obwodu pierwotnego,  
 $R_1$  - rezystancja obwodu pierwotnego,  
 $L_1$  - indukcyjność uzwojenia pierwotnego,  
 $L_{R1}$  - indukcyjność rozproszenia: ok. 2,6 mH.

$$\text{Transformata obwodu pierwotnego: } Z_1(s) = R_1 \frac{1}{1 + s \frac{L_{R1} H L_1}{C_1 R_1}} \quad (3.22)$$

Impedancja została wyznaczona między punktami:  $A$  i  $B$ .

Dla obwodu pierwotnego na podstawie II prawa Kirchhoffa, po przekształceniach otrzymuje się wzór na transformatę napięcia pierwotnego:

$$U_p(s) = \frac{R_1}{1 + s \frac{L_{R1} H L_1}{C_1 R_1}} \frac{\frac{U}{s} \ominus L_{R1} H u_C(0) H \frac{1}{C_1 s} H L_1 i(0) \ominus L_1 s}{R_1} \quad (3.23)$$



Po przekształceniach uzyskuje się:

$$U_p(s) = \frac{s^2(L_1 C_1 R_1 \wp L_{R1} C_1 R_1) H s R_1 L_1 i(0) C_1 H R_1 C_1 U H u_c(0) C_1 R_1 H R_1}{s[s C_1(L_1 H L_{R1}) H R_1 C_1]}$$

Wyznacza się pierwiastki mianownika, które wynoszą:

$$s_1 = 0,$$

$$s_2 = \frac{\wp R_1}{L_1 H L_{R1}},$$

w związku z tym, iż jeden z pierwiastków mianownika jest równy zero zastosowano rozkład na ułamki proste wg. II postaci wzoru Heaviside'a:

$$f(t) \approx \frac{A(0)}{B_*(0)} H \sum_{k=2}^n \frac{A(s_k)}{s_k B'_*(s_k)} e^{s_k t},$$

gdzie:  $k=2,3,\dots$

$$B'(0) = B_*(0)$$

$$B'(s_k) \approx s_k B'_*(s_k),$$

po podstawieniach otrzymuje się: (3.24),

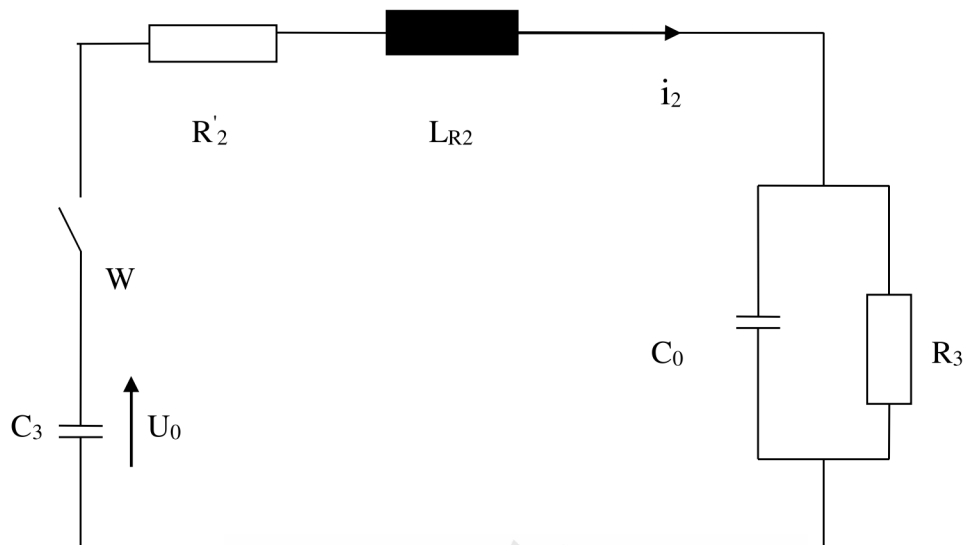
$$U_p(t) \approx \frac{R_1 C_1 U H u_c(0) C_1 R_1 H R_1}{R_1 C_1} H^{\tau_1^2(L_1 C_1 R_1 \wp L_{R1} C_1 R_1) \wp \tau_1 L_1 i(0) C_1 H R_1 C_1 U H u_c(0) C_1 R_1 H R_1} \frac{1}{2\tau_1^2(L_1 H L_{R1}) C_1 H R_1 C_1} e^{\wp \tau_1 t},$$

$$\text{gdzie: } \tau_1 = \frac{R_1}{L_1 H L_{R1}},$$

$u_c(0)$  warunek początkowy napięcia na kondensatorze;

$i(0)$  warunek początkowy prądu w obwodzie pierwotnym.

### Napięcie wtórne:



Rys.3.4. Schemat zastępczy dla narostu wysokiego napięcia [62]

gdzie:  $U_0$  – napięcie zależne od prędkości obrotowej, wynosi ok. 300V, powstaje w uzwojeniu pierwotnym na skutek przepięć łączeniowych i samoindukcji,

$C_3$  – pojemność obwodu wtórnego,

$C_0$  - pojemność świecy zapłonowej,

$R_3$  – rezystancja bocznikująca: 1- 10 M $\Omega$ ,

$L_{R2}$  – indukcyjność rozproszenia obwodu wtórnego: ok. 7,2 mH.

$i_2$  - prąd iskry,

$R'_2$  - rezystancja obwodu wtórnego.

$$\frac{U_0}{s} Z I_2(s) (sL_{R2} HR_2, H \frac{1}{sC_3} H \frac{R_3}{1HsC_0R_3}), \quad (3.25)$$

stąd :

$$I_2 \Phi \frac{U_0}{s} \frac{s^2 R_3 C_3 C_0 H s C_3}{s^3 L_{R2} C_3 C_0 R_3 H s^2 (L_{R2} C_3 H R_2, R_3 C_3 C_0) H s (C_3 R_2, H R_3 C_0 H C_3 R_3) H I}. \quad (3.25)$$

Po pomnożeniu przez transformatę dwójnika  $R_3 C_0$ :

$$Z Z \frac{R_3}{1HsR_3C_0},$$

napięcie wtórne transformowane do obwodu pierwotnego jest równe:

$$U_s Z I_2(s) Z(s) Z \frac{U_0 C_3 R_3}{s^3 L_{R2} C_3 C_0 R_3 H s^2 (L_{R2} C_3 H R_2 R_3 C_3 C_0) H s (C_3 R_2 H R_3 C_0 H C_3 R_3) H 1} \quad (3.26)$$

Stosując wzór Heaviside'a w I postaci tj.:

$$f(t) Z \sum_{k=1}^n \frac{A(s_k)}{B'(s_k)} e^{s_k t},$$

oraz korzystając z własności transformaty Laplace'a uzyskuje się : (3.27)

$$U_s(t) Z \frac{U_0 n \sin^2 2\psi}{L_{R2} C_0 p_1 (1 H 3 \cos^2 2\psi)} e^{\frac{9a}{3} t} [e^{9(2\sqrt{\frac{p_1}{3}} \operatorname{ctg} 2\psi)t} \wp(\cos(\frac{p_1}{\sin 2\psi} t) \wp \sqrt{3} \cos 2\psi \sin(\frac{p_1}{\sin 2\psi} t)] e^{(\sqrt{\frac{p_1}{3}} \operatorname{ctg} 2\psi)t}$$

gdzie:

$$a = \frac{1}{R_3 C_0} H \frac{R_1}{L_{R2}},$$

$$\psi Z \arctg \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\omega}{2}},$$

$$\omega Z \arctg \frac{2}{q} \sqrt{\frac{p_1^3}{27}},$$

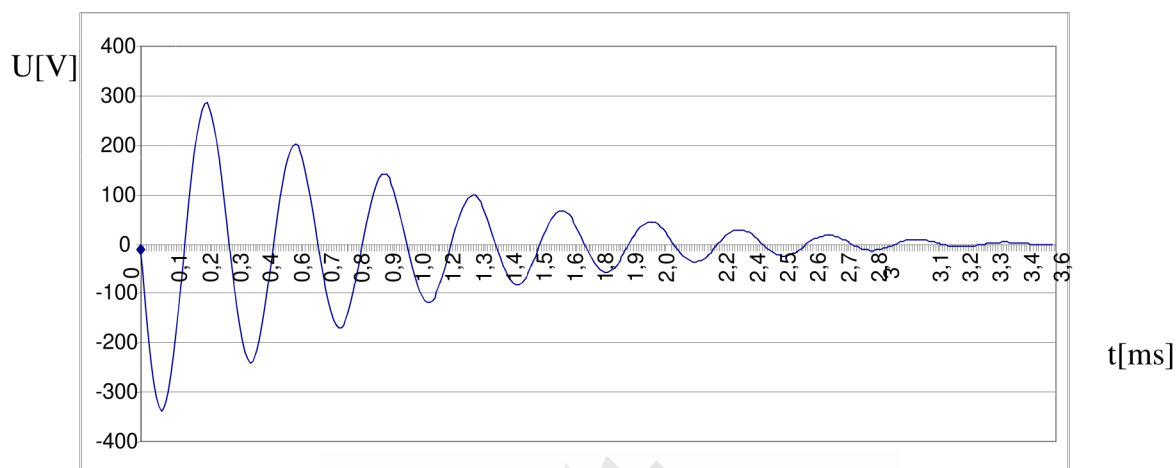
$$q = \left( \frac{1}{R_3 C_0} H \frac{R_2}{L_{R2}} \right) \left\{ \frac{2}{27} \left( \frac{1}{R_3 C_0} H \frac{R_2}{L_{R2}} \right)^2 H \frac{1}{L_{R2} C_3} \left[ \frac{L_{R2} C_3}{L_{R2} C_3 H R_2 R_3 C_0 C_3} \wp \frac{1}{3} \left( \frac{R_2 C_3}{R_3 C_0} H 1 H \frac{C_3}{C_0} \right) \right] \right\}$$

$$p_1 Z \frac{1}{L_{R2}} \left( \frac{R_2}{R_3} H \frac{C_0}{C_3} H 1 \wp \frac{1}{3} \left( \frac{L_{R2}}{R_3^2 C_0} H \frac{2R_2}{R_3} H \frac{R_2^2 C_0}{L_{R2}} \right) \right).$$

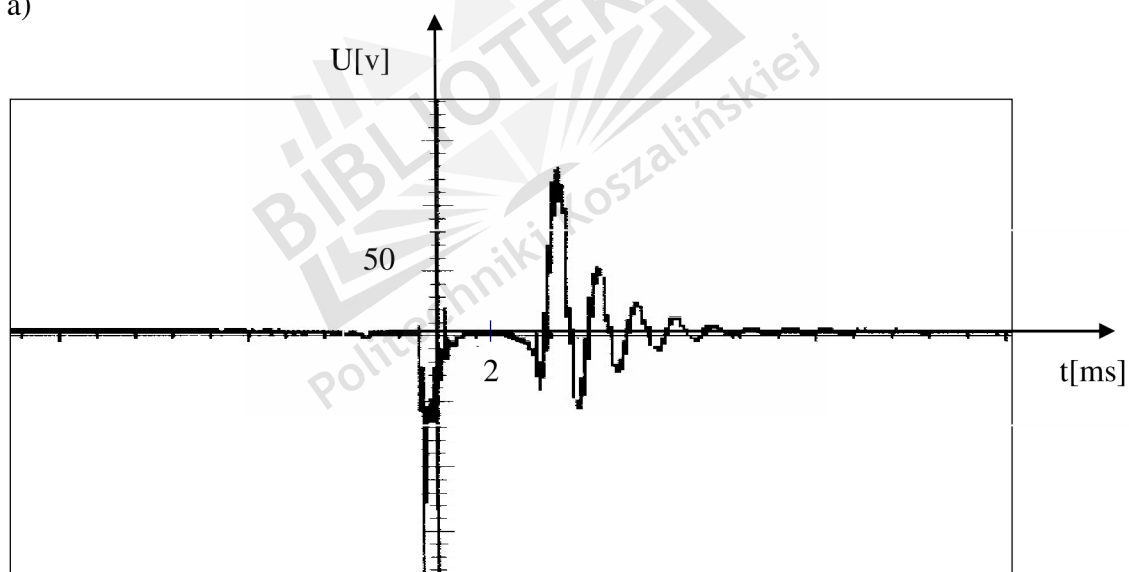
Napięcie wtórne do momentu przeskoaku iskry przebiega jak przedstawiono na rysunku 2.4b.

### 3.8. Przebiegi napięć obwodu zapłonu wykreślone na podstawie równań teoretycznych

W rozdziale tym wykreślono napięcia: pierwotne, wtórne oraz napięcie na pojemności obwodu pierwotnego na podstawie równań. Ich prawidłowy przebieg świadczy o poprawnym rozwiązaniu równań.



a)



b)

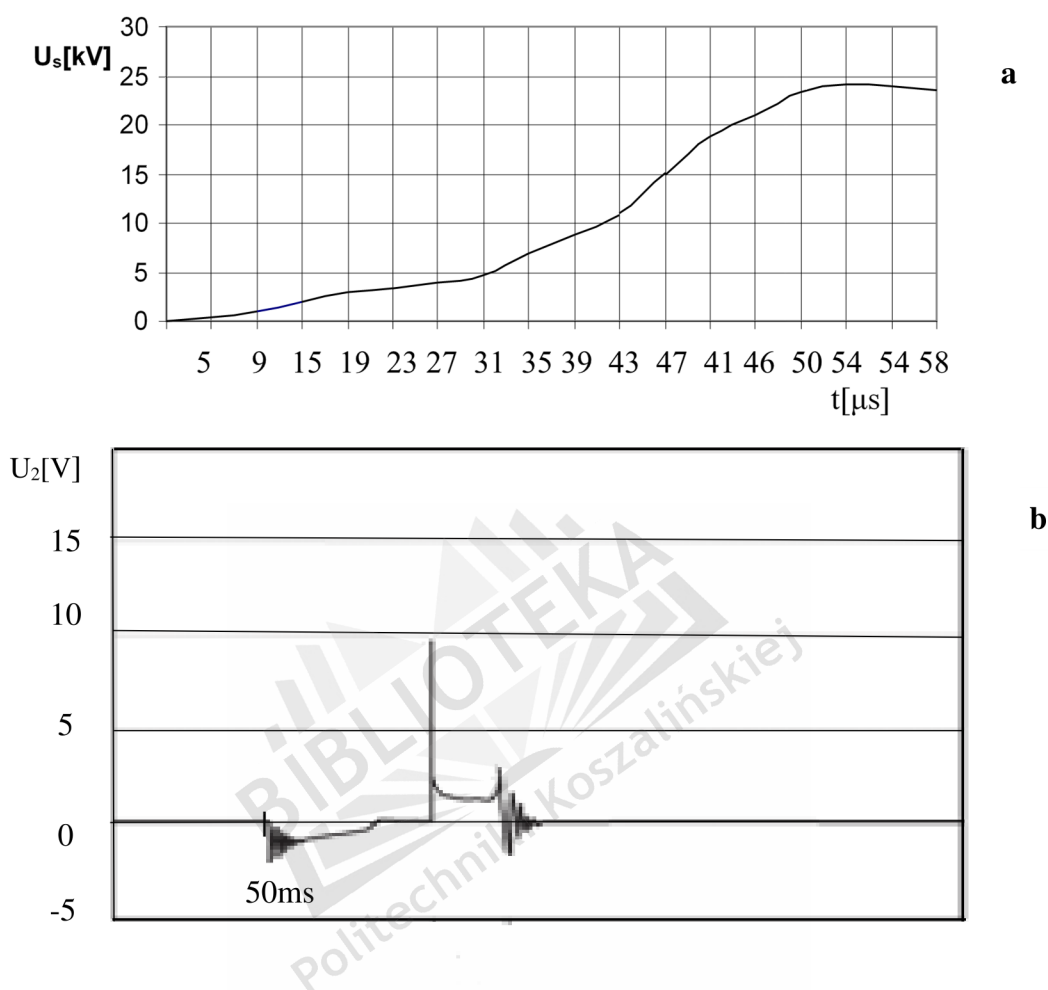
Rys.3.5. Przebieg napięcia na pojemności według równania: (3.10) – a) oraz przebieg rzeczywisty: b)

Na rysunku 3.5 wykreślono przebieg napięcia na pojemności obwodu pierwotnego, na podstawie równania (3.10). Obrazuje ono przebieg ładowania się pojemności obwodu pierwotnego zapłonu.

W równaniu przyjęto wartości:  $R = 3,83\Omega$ ,  $L = 18mH$ ,  $C = 173,2nF$ .

Przebieg pokrywa się z pomiarami przebiegu napięcia na pojemności obwodu pierwotnego przedstawionymi na rysunku 3.5 – b.

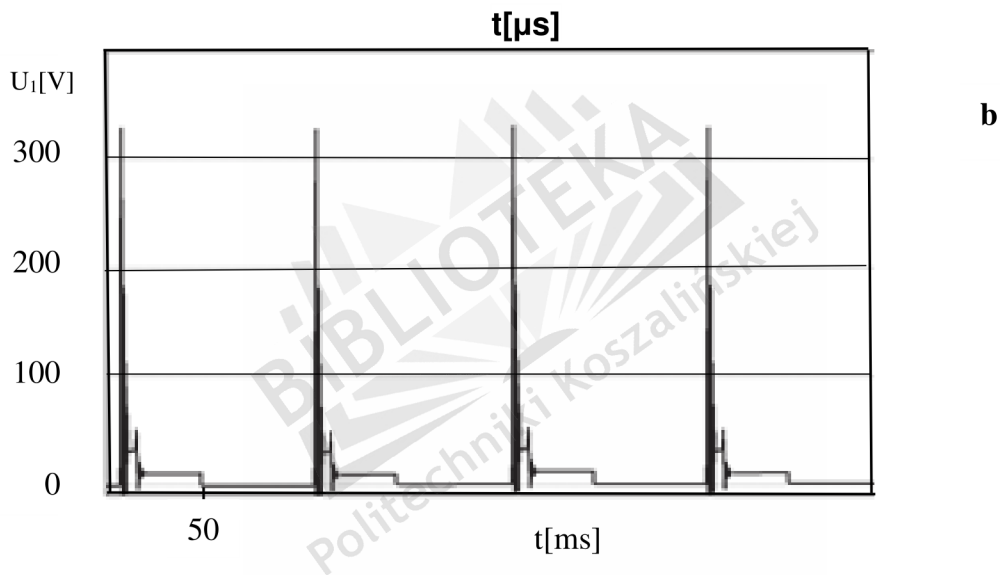
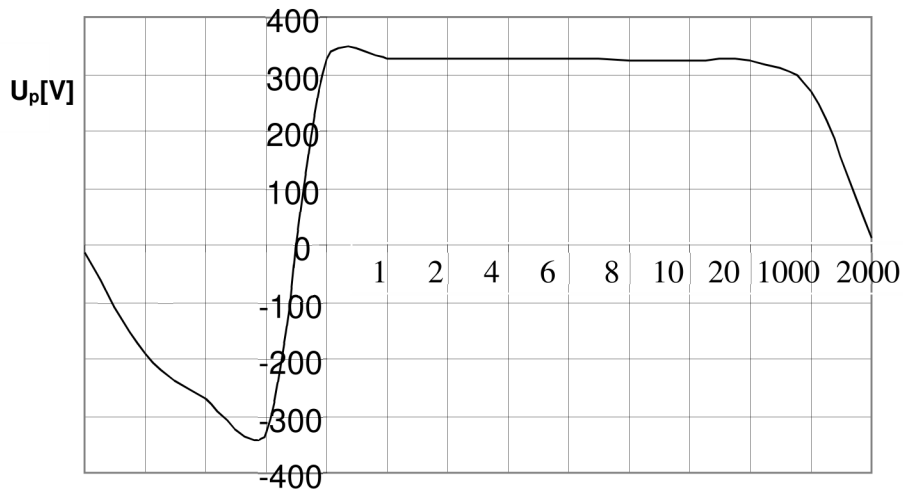
### Napięcie wtórne



Rys.3.6. Przebieg napięcia wtórnego wg. równania (3.27) [62], rysunek: a przebieg teoretyczny, rysunek: b przebieg rzeczywisty - wzorcowy

Porównując przebieg teoretyczny z praktycznym należy potwierdzić duże podobieństwo obu rysunków. W przebiegu teoretycznym i rzeczywistym można wyodrębnić początek i koniec iskry zapłonowej. Różnice przebiegów spowodowane są uproszczeniami w rozwiązaniu równań na przykład w równaniu teoretycznym nie uwzględniono sprzężenia magnetycznego uzwojeń cewki zapłonowej oraz stochastycznym charakterem wyładowania iskrowego, które jest zależne od wielu czynników.

### Napięcie pierwotne

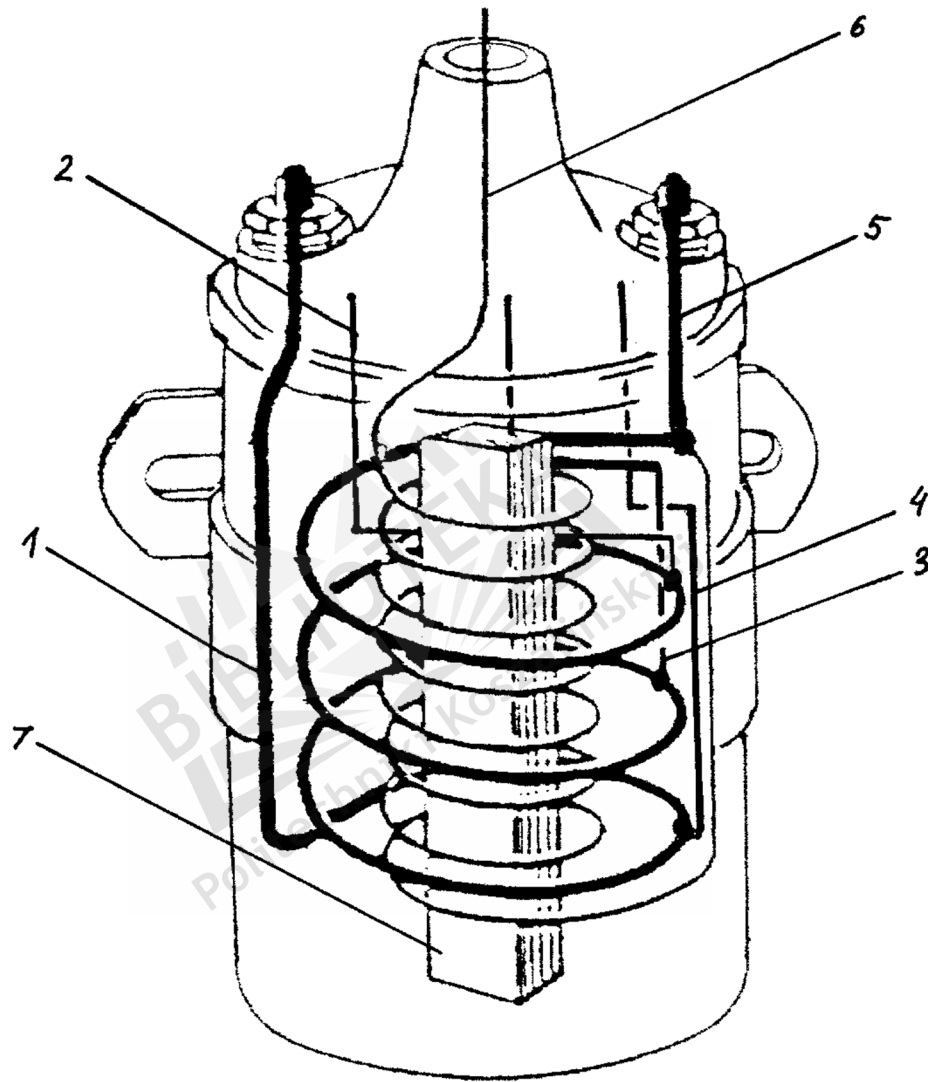


Rys.3.7. Przebieg napięcia pierwotnego wg. równania (3.24). Rysunek a: przebieg według równania (3.24), rysunek b: przebieg wzorcowy rzeczywisty

Przebiegi teoretyczny i rzeczywisty przebiegu napięcia pierwotnego wykazują duże podobieństwo. W obu przebiegach można wyodrębnić poszczególne fazy napięcia. Wartości maksymalne osiągają podobne wartości około 300V, co jest zgodne z opisem zawartym w literaturze samochodowej.

#### 4. KONSTRUKCJA CEWKI Z REGULOWANĄ INDUKCYJNOŚCIĄ

Do konstrukcji cewki zapłonowej wykorzystano cewkę typową przedstawioną na rys. 4.1.



Rys.4.1. Konstrukcja cewki zapłonowej z możliwością regulacji indukcyjności obwodu pierwotnego [71,72]

gdzie: 1 Początek uzwojenia pierwotnego.

2,3,4 Zaciski pośrednie uzwojenia pierwotnego.

5 Koniec uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej.

6 Koniec uzwojenia wtórnego.

7 Rdzeń cewki zapłonowej.

W cewce zapłonowej uzwojenie pierwotne miało rezystancję  $R_1=3,2 \Omega$ . Uzwojenie to, zostało podzielone na cztery sekcje o równych rezystancjach  $R= 0,8 \Omega$ . Jak wykazały badania

przebiegu strumienia magnetycznego w cewce, nie spowodowało to pogorszenia rozkładu strumienia magnetycznego w cewce. Badanie przebiegu strumienia magnetycznego przeprowadzono w stanie ustalonym poprzez obserwację jego kształtu.

Koniec każdej sekcji został wyprowadzony na zewnątrz i wyposażony w własny zacisk, tak aby umożliwić montaż cewki w obwodzie zapłonu z wybraną indukcyjnością uzwojenia pierwotnego. W czasie badań zauważono, iż ze względu na duże prądy płynące przy zmniejszonej indukcyjności, istnieje konieczność wyposażenia cewki w dodatkowy radiator zwiększający chłodzenie cewki. Konstrukcja cewki umożliwia zmianę indukcyjności uzwojenia pierwotnego co 4,5 mH.

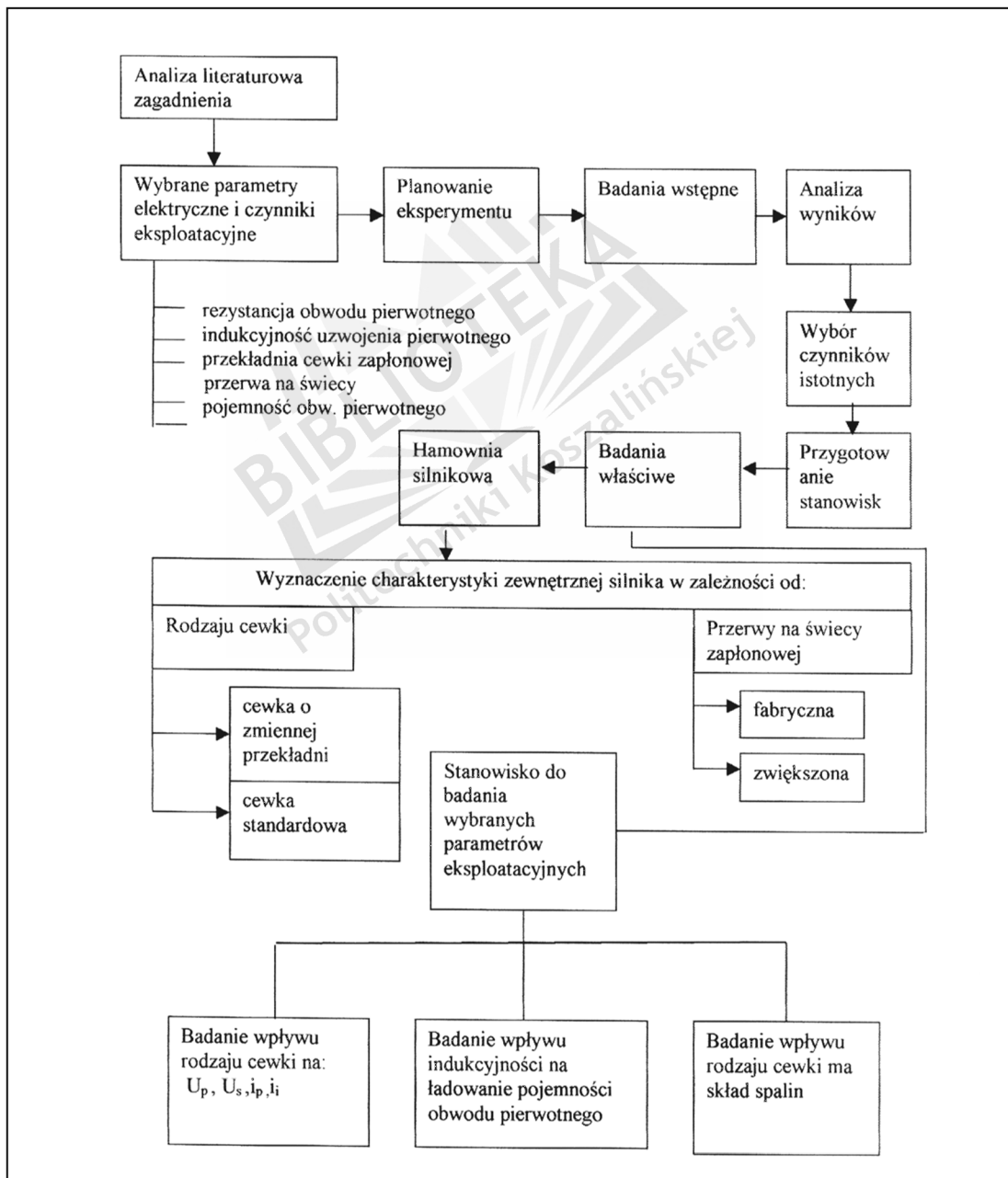
Cewka z regulacją indukcyjności została zamontowana w samochodzie Opel Astra, po czym dokonano pomiaru przebiegu napięć pierwotnych i wtórnych dla różnych prędkości obrotowych. Rejestrowano również przebiegi prądów w uzwojeniu pierwotnym dla cewki regulowanej i fabrycznej. Pomiarów i rejestracji dokonano za pomocą diagnostyki samochodowej, o czym będzie mowa w dalszej części pracy.

Sterowanie procesem komutacji można zrealizować elektronicznie. Do sterowania procesem komutacji można wykorzystać napięcie czujnika prędkości obrotowej stosowanego powszechnie w układach zapłonowych sterowanych elektronicznie, znajdującego się przy kole zamachowym silnika lub w układach klasycznych z sygnału zapłonowego, pochodzącego z obwodu zapłonowego, służącego również do pomiaru prędkości obrotowej.



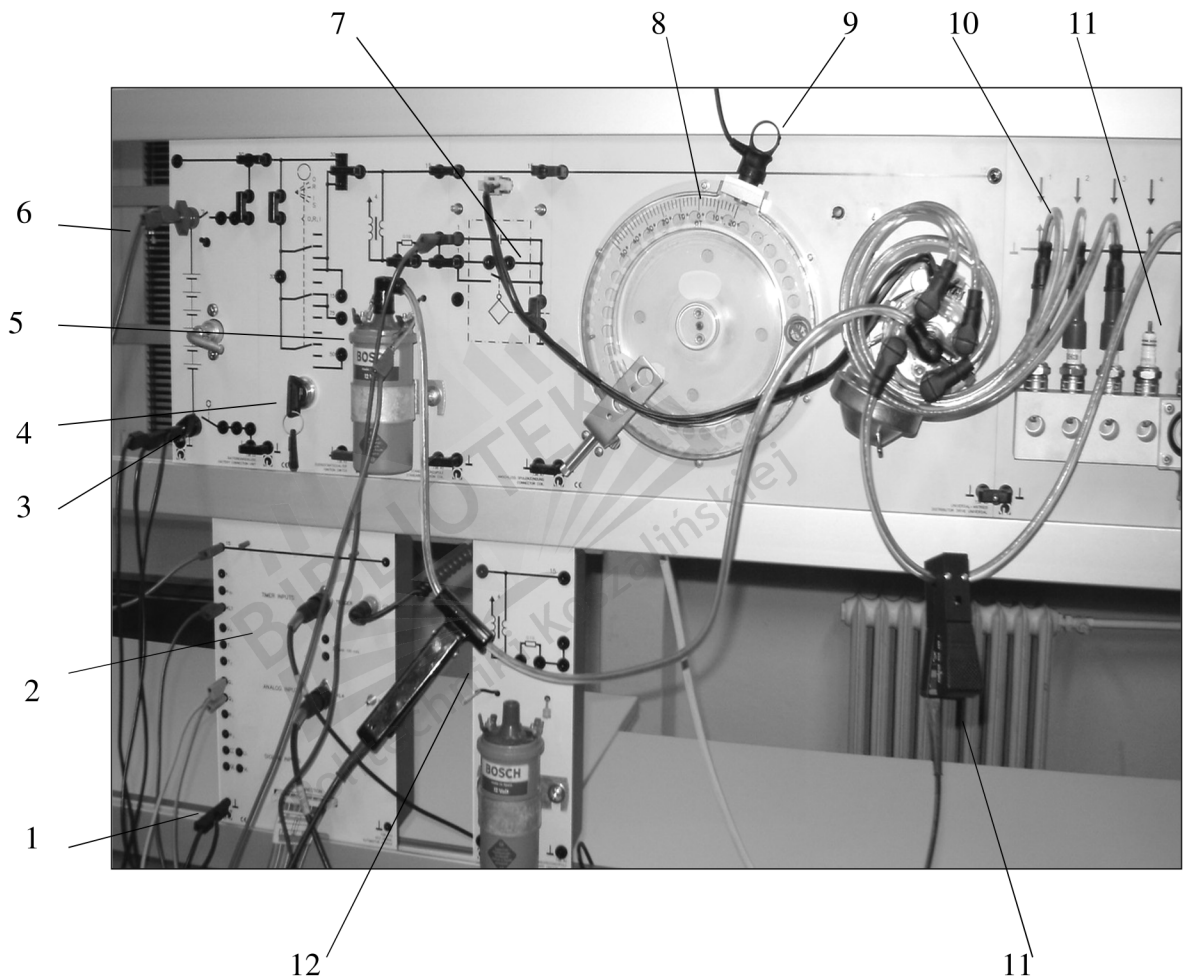
## 5. WPŁYW INDUKCYJNOŚCI WŁASNEJ OBWODU PIERWOTNEGO NA PRACĘ UKŁADU

W punkcie tym przeprowadzono badania eksperymentalne dotyczące: wpływu indukcyjności obwodu pierwotnego na napięcie pierwotne i wtórne układu zapłonowego. W badaniach ograniczono się do zmian indukcyjności cewki zapłonowej w granicach od 1/4 do 2 wartości nominalnej tj. od 4,5 – 36mH i  $R_1 = 1,9 - 7,66 \Omega$ . Zwiększoną indukcyjność uzyskano przez dołączenie dodatkowego uzwojenia pierwotnego, nieskojarzonego. Do zmniejszenia indukcyjności wykorzystano cewkę z odczepami.



Rys.5.1. Schemat badań eksperymentalnych przeprowadzonych w rozprawie doktorskiej

Badania wpływu indukcyjności na pracę układu zapłonowego przeprowadzono na stanowisku: firmy Leybold Didactic.(Rys.5.2). Oscylogramy zarejestrowano przy pomocy programu fabrycznego Cassy. Stanowisko pomiarowe zbudowane jest z rzeczywistych podzespołów samochodowych. Posiada przyłącze komputerowe umożliwiające rejestrację badanych przebiegów.



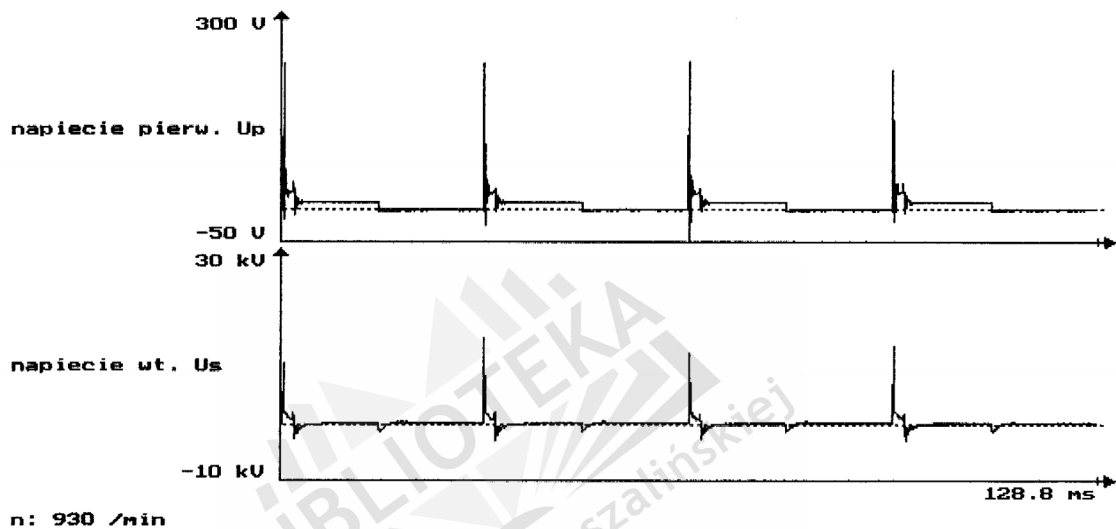
Rys.5.2. Stanowisko pomiarowe

- gdzie: 1. Panel do komputerowej rejestracji przebiegów, biegun ujemny / masa/.
2. Panel do komputerowej rejestracji przebiegów, gniazda przyłączeniowe.
3. Przyłącze akumulatora / masa/.
4. Włącznik zapłonu.
5. Cewka zapłonowa.
6. Przyłącze akumulatora, biegun dodatni.
7. Zespół nadajnika impulsów zapłonowych / przerywacza/.
8. Koło zamachowe z wieńcem zębatym.
9. Czujnik położenia koła zamachowego.
10. Przewody wysokiego napięcia do świec zapłonowych.
11. Świeca zapłonowa.
12. Sonda pomiarowa wysokiego napięcia.

### 5.1. Przebieg napięcia pierwotnego $U_p$ i wtórnego $U_s$ dla prędkości $n \sim 930$ obr./min.

Badania przebiegów napięć w tym punkcie przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys.5.2.

Oscylogram na rys.5.3. przedstawia przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego w stykowym układzie zapłonowym dla prędkości biegu jałowego  $900 \pm 50$  obr./min. Jest wykonany bez zmian parametrów obwodu zapłonu.



Rys. 5.3. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego zapłonu dla cewki fabrycznej

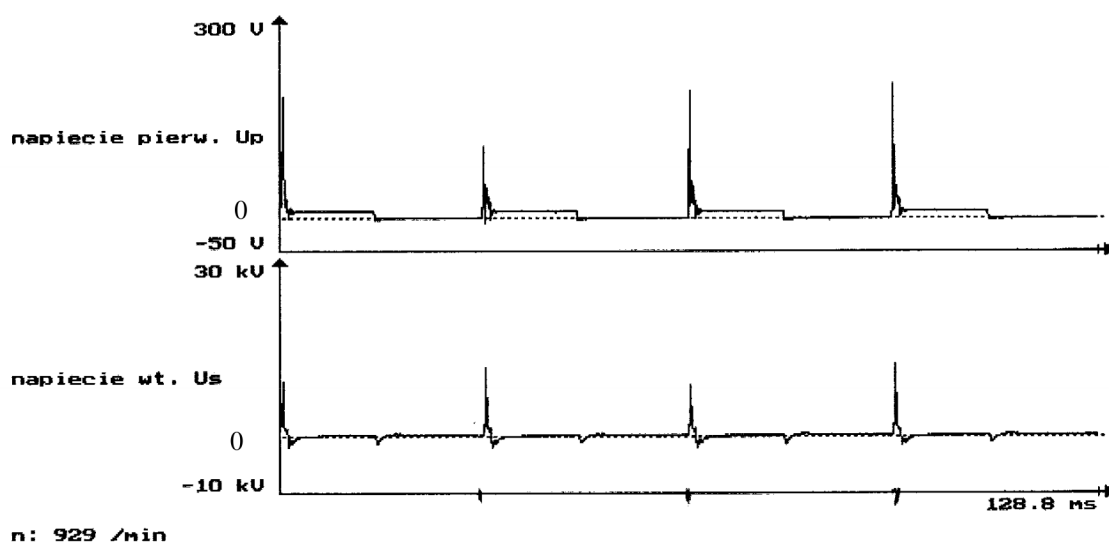
$$L_1 = 18\text{mH}, R_1 = 3,83\Omega$$

Wartość napięcia pierwotnego  $U_p$  waha się w granicach: - 54V do 233V.

Wartość napięcia wtórnego  $U_{s\text{max}}$  zmienia się od 15,4kV do 13,5kV na poszczególnych cylindrach.

#### Przebieg napięcia pierwotnego przy zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego

Wartość indukcyjności przyjęto jako 25% nominalnej  $L_n$  tj.  $L = 4,5$  mH. Zmniejszenie indukcyjności dokonano za pomocą prototypowej cewki zapłonowej z odczepami, przedstawionej na rys.4.1.



Rys. 5.4. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla zmniejszonej indukcyjności

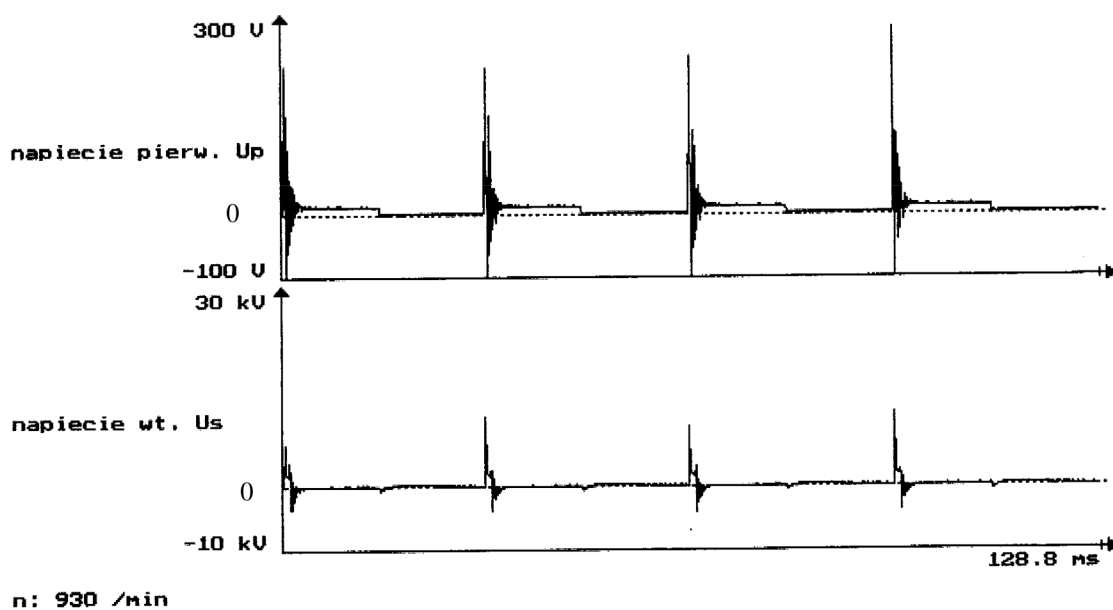
Oscylogram z Rys.5.4. przedstawia przebieg napięcia  $U_p$  i  $U_s$  przy zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego. Przebiegi obu napięć, różnią się od przebiegu podstawowego.

Amplituda napięcia pierwotnego zmienia się w granicach : 100-200V.

Wartość  $U_{smax}$  waha się od 10,7kV do 12,4kV. W odcinku iskry widać obniżenie linii iskry. W momencie zamknięcia przerywacza zapłonu , napięcie pierwotne zanika na znacznie szybciej niż na rys.5.3.

### **Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego przy zwiększonej indukcyjności obwodu pierwotnego**

Wartość indukcyjności przyjętej do badań wynosi  $2L_n$  tj.  $L= 36mH$ . Zwiększenie indukcyjności osiągnięto przez dodanie zewnętrznego uzwojenia pierwotnego.



Rys.5.5. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla zwiększonej indukcyjności

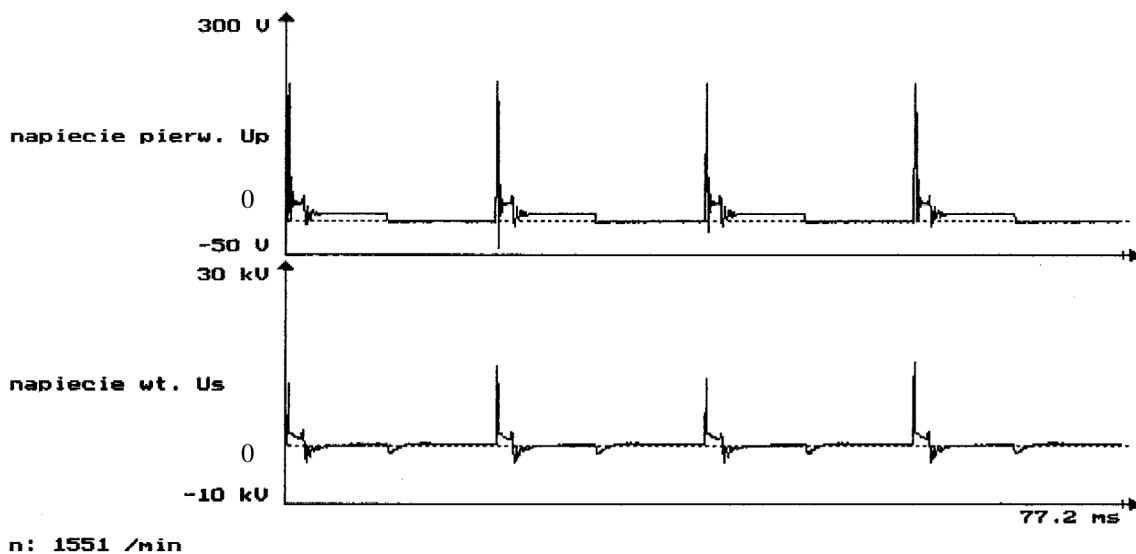
Wartość  $U_p$  zawiera się w granicach: -100 do 300V. Przebieg znacznie zmieniony, pojawiają się oscylacje napięcia trwające do zwarcia styków przerywacza zapłonu.

Amplituda napięcia  $U_s$  wynosi od 8,5 do 10,5 kV. Linia iskry skrócona i zmieniona, pojawiają się oscylacje napięcia wskutek wymiany energii między indukcyjnością obwodu pierwotnego a pojemnością.

## 5.2. Przebieg napięcia $U_p$ i $U_s$ dla $n \sim 1550$ obr/min. przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego

### Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego przy parametrach znamionowych

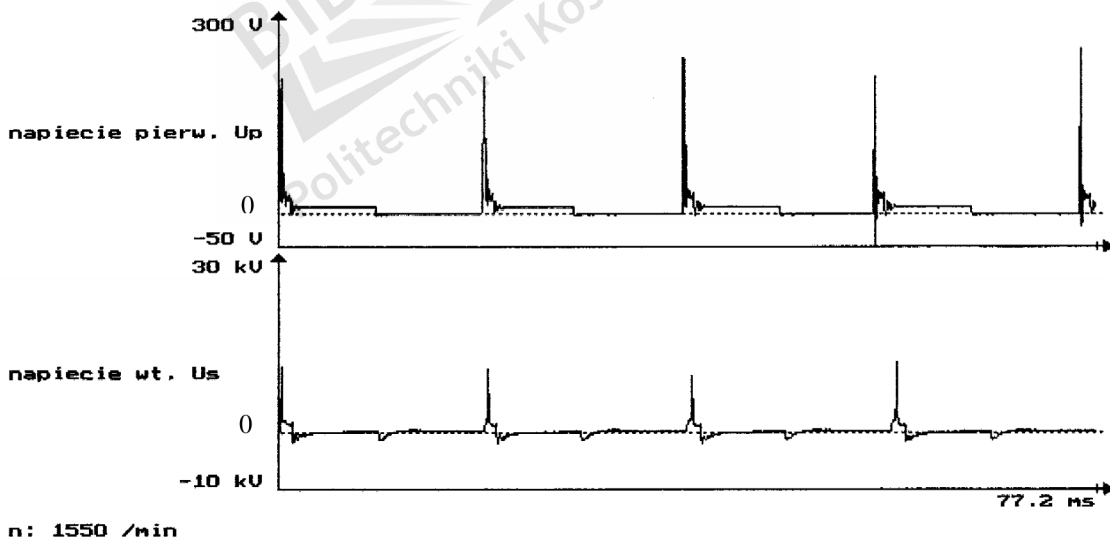
Przebiegi napięć przedstawiono na rysunkach: 5.6. i 5.7.



Rys. 5.6. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla parametrów znamionowych

Wartość maksymalna napięcia  $U_p$  wynosi ok. 220V, natomiast napięcie  $U_{smax}$  waha się od 13 do 15kV.

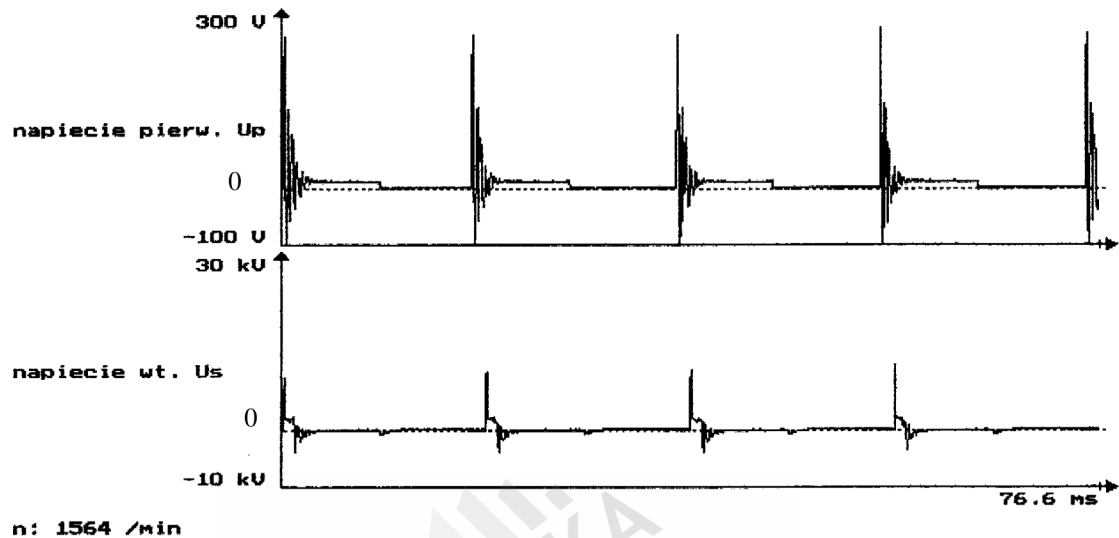
**Przebieg napięcia  $U_p$  i  $U_s$  przy zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego**



Rys. 5.7. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego

Wartość napięcia  $U_{pmax}$  zawiera się w granicach: 180 do 280V. Napięcie  $U_{smax}$  waha się od 10 do 10,5kV. Linia iskry zmieniona - obniżona.

## Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy zwiększonej indukcyjności obwodu pierwotnego

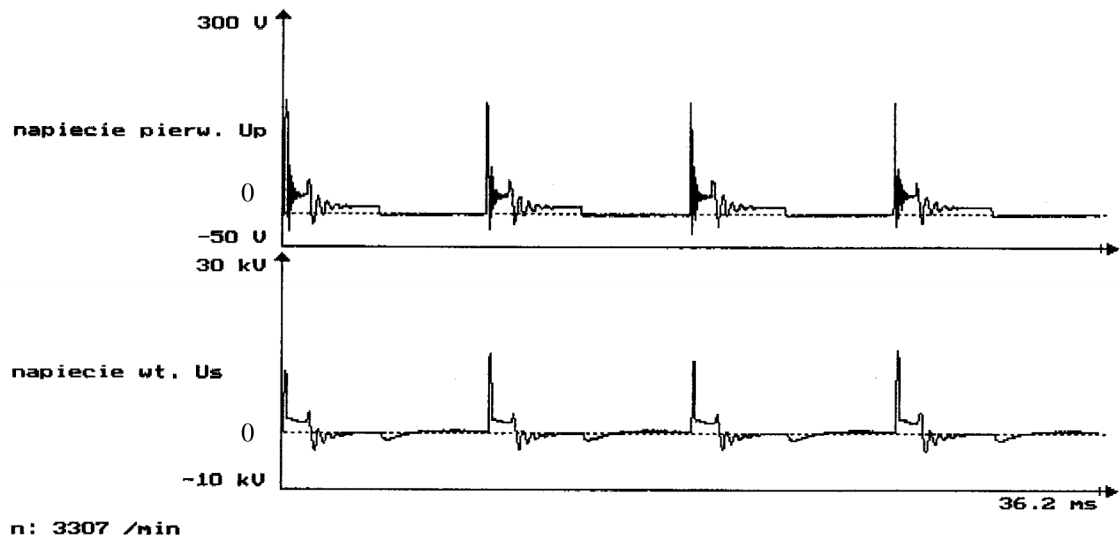


Rys. 5.8. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla zwiększonej indukcyjności

W przebiegu napięcia  $U_p$  widać silne oscylacje o amplitudzie 120V i częstotliwości ok.5kHz.  $U_{pmax}$  wynosi około 280V. Wartość napięcia  $U_s$  zawiera się w granicach: 9.9 do 10,2kV. Linia iskry jest zdegradowana.

### 5.3. Przebiegi napięcia $U_p$ i $U_s$ dla $n \sim 3350$ obrotów/minutę przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego

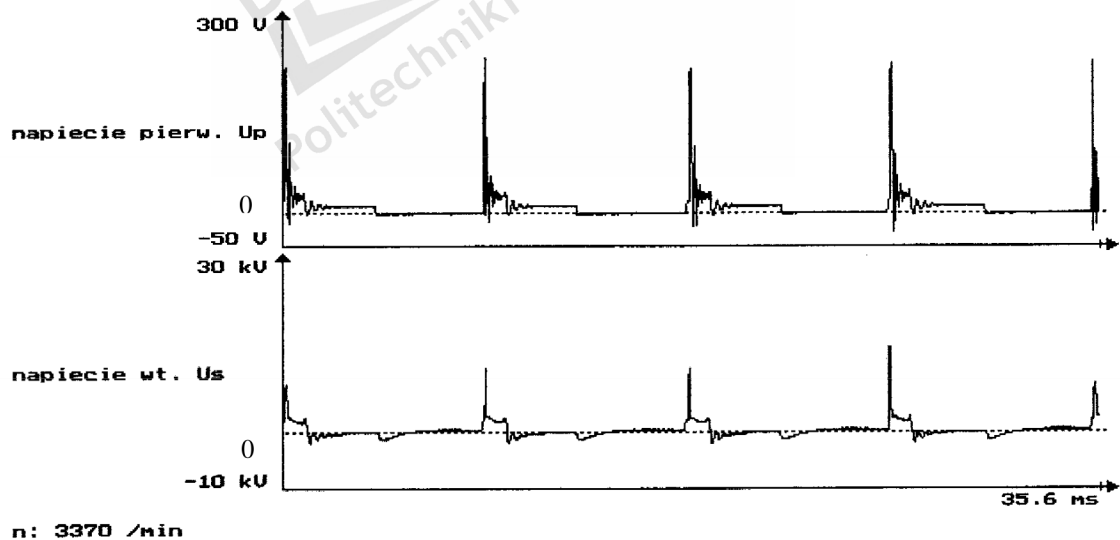
Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy parametrach znamionowych



Rys. 5.9. Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla parametrów znamionowych

Na rys.5.9 napięcie  $U_p$  osiąga wartość maksymalną około 170 V. Napięcie  $U_{smax} = 10 - 12$  kV.

**Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego**

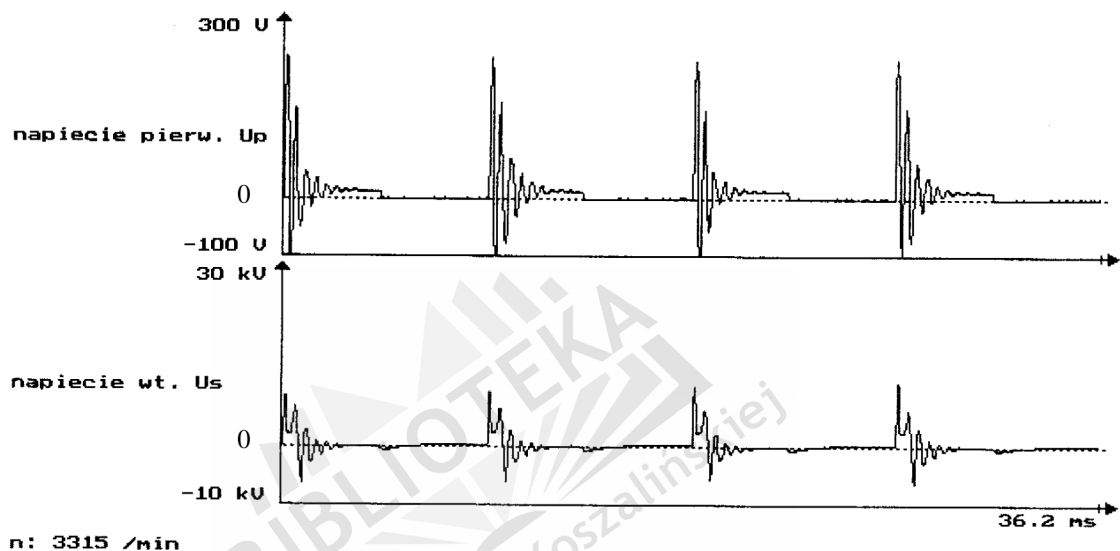


Rys.5.10. Przebiegi napięć dla zmniejszonej indukcyjności obwodu



Napięcie  $U_p$  osiąga wartość około 270V. Widać intensywne oscylacje napięcia o częstotliwości ok.5kHz. Napięcie wtórne waha się w granicach od 10 do 13kV. Przebieg iskry rozciągnięty i spłaszczony.

### Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego przy zwiększonej indukcyjności obwodu pierwotnego



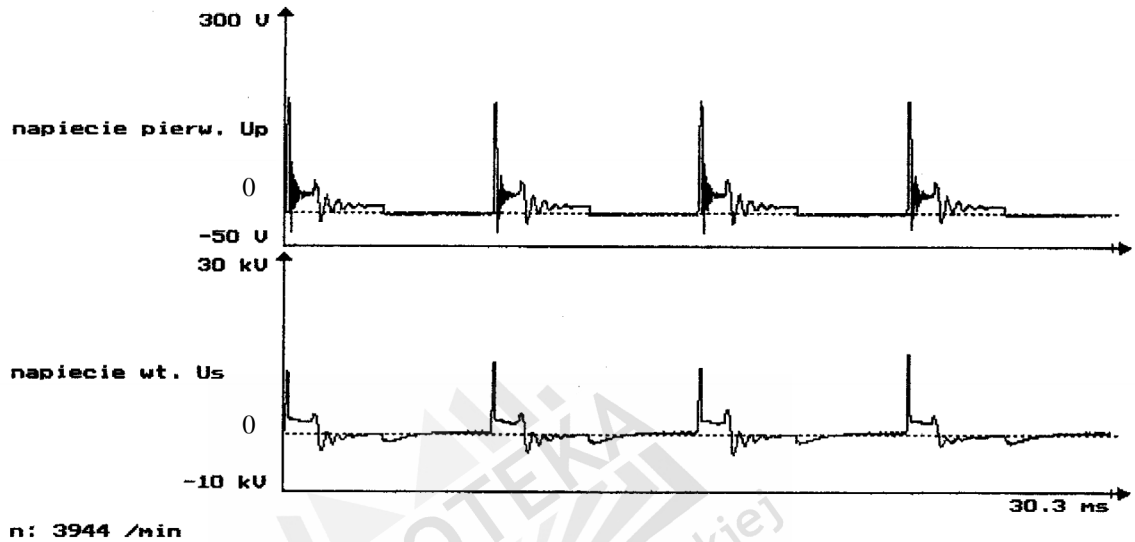
Rys. 5.11. Przebiegi napięć dla zwiększonej indukcyjności

Napięcie pierwotne oscyluje od wartości  $-100V$  do ok.270V, z częstotliwością  $f \sim 1,6Hz$ . Napięcie  $U_p$  przechodzi w oscylacje elektryczne, nie można wyróżnić etapów zapłonu.

Napięcie wtórne podobnie jak pierwotne – składa się z oscylacji elektrycznych, nie można odróżnić linii iskry. Napięcie  $U_{smax}$  wynosi około 10kV. Na kształt przebiegów wpłynęła zwiększona indukcyjność obwodu pierwotnego.

#### 5.4. Przebiegi napięcia pierwotnego $U_p$ i wtórnego $U_s$ dla $n \sim 4000$ obr/min. przy różnych wartościach indukcyjności obwodu pierwotnego

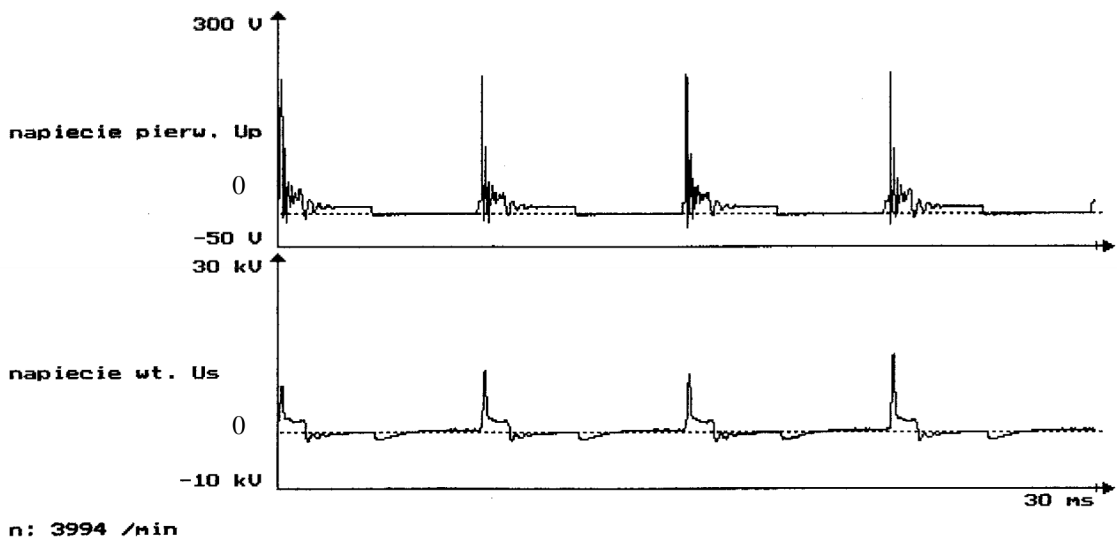
##### Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy parametrach znamionowych



Rys. 5.12. Przebiegi dla znamionowej indukcyjności

Jest to oscylogram dla znamionowych parametrów obwodu zapłonowego. Wartość napięcia  $U_{pmax}$  wynosi około 170V, wartość napięcia wtórnego  $U_{smax}$  wynosi około 11,4kV.

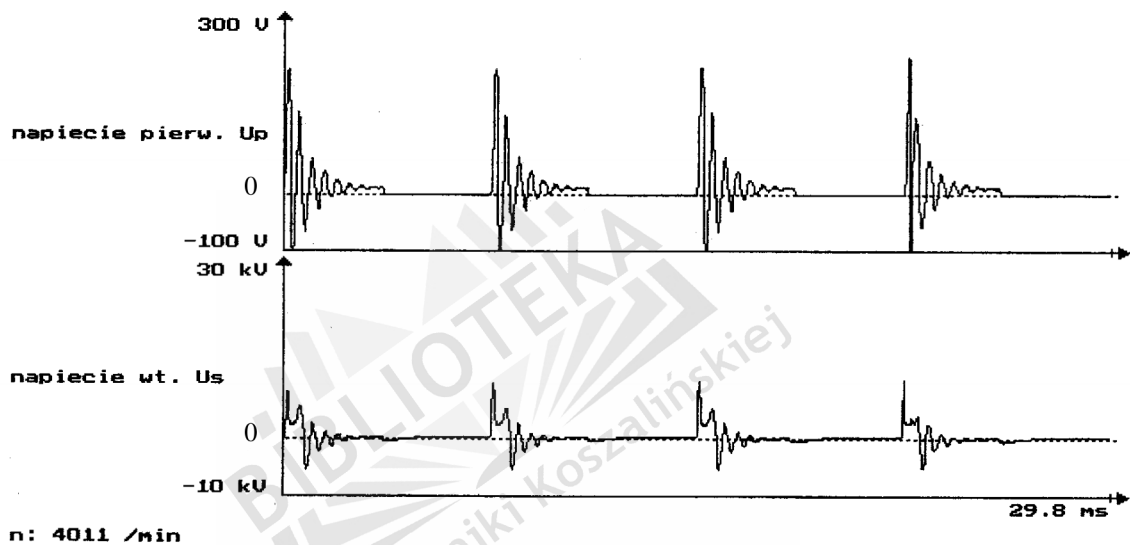
##### Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy zmniejszonej indukcyjności



Rys. 5.13. Przebiegi dla zmniejszonej indukcyjności

Na rysunku 5.13 w przebiegu napięcia  $U_p$  widać silne oscylacje o częstotliwości  $f$  około 11.7kHz. Jego wartość maksymalna wynosi około 270V. Przed wartością maksymalną napięcia widać oscylacje. W przebiegu napięcia  $U_s$  linia iskry jest rozmyta przez oscylacje. Igła napięcia przebicia niewyraźna. Wartość maksymalna napięcia wtórnego wynosi około 11,4kV.

### Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego przy zwiększonej indukcyjności obwodu pierwotnego



Rys. 5.14. Przebiegi dla zwiększonej indukcyjności

Przebieg napięcia pierwotnego  $U_p$  przechodzi z wartości maksymalnej w oscylacje gasnące o częstotliwości  $f$  równej 1.96kHz. Zmienność napięcia wynosi od  $-100V$  do  $270V$ .

Przebieg napięcia wtórnego  $U_s$  przebieg przechodzi w oscylacje gasnące o częstotliwości zbliżonej do obwodu pierwotnego. Wartość napięcia  $U_{smax} = 9,6kV$ . W wartościach ujemnych oscylacje osiągają  $-5kV$ . Linia iskry całkowicie zmieniona w stosunku do znamionowej.

### Wnioski do rozdziałów 5.1, 5.2, 5.3, 5.4.

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej maleje wartość  $U_{smax}$ , na co wpływ ma mniejszy czas zwarcia styków przerywacza zapłonu oraz wartość indukcyjności obwodu pierwotnego. Ze wzrostem prędkości obrotowej widać rosnący wpływ indukcyjności obwodu pierwotnego jako elementu zachowawczego nie pozwalającego na szybkie zmiany energii. Przy zmniejszonej indukcyjności obwodu pierwotnego, rośnie częstotliwość oscylacji obu

napięć. Natomiast przy zwiększonej indukcyjności, częstotliwość oscylacji maleje. Prowadzi to do zmian przebiegów napięć, aż do całkowitej ich degeneracji i przejścia przebiegów w oscylacje. Indukcyjność obwodu pierwotnego ma bardzo duży wpływ na przebieg  $U_p$  oraz  $U_s$ . Powinna się zawierać w określonych granicach lub ulegać okresowym zmianom.

**Wartości napięć pierwotnych  $U_p$  i wtórnych  $U_{smax}$  uzyskanych  
w rozdziałach 5.1, 5.2, 5.3, 5.4.**

**Tabela 5.1**

n[obr/min.]	$L_p$ [mH]	$U_{pmax}$ [V]	$U_{smax}$ {kV}
około 900	18	233	15,4
	4,5	200	12,4
	36	300	10,5
około 1550	18	220	15
	4,5	280	10,5
	36	280	10,2
około 3350	18	170	12
	4,5	270	13
	36	270	10
około 4000	18	170	11,4
	4,5	270	11,4
	36	270	9,6

### 5.5. Badanie wpływu indukcyjności obwodu pierwotnego na prąd w obwodzie pierwotnym bateryjnego układu zapłonowego z zastosowaniem cewki zapłonowej o zmiennej przekładni

Na jakość pracy bateryjnego układu zapłonowego fundamentalny wpływ wywiera przebieg prądu w obwodzie pierwotnym  $i_1$ . Od jego przebiegu zależy jakość, a przede wszystkim wysokość napięcia pierwotnego  $U_p$  i w rezultacie wtórnego  $U_s$  układu zapłonowego.

Bateryjny układ zapłonowy jest pozbawiony praktycznie możliwości sterowania prądem pierwotnym, poza możliwością zastosowania oporu o rezystancji zależnej od temperatury, stosowanego w czasie rozruchu zimnego silnika. W opisanym eksperymencie zastosowano prototyp cewki zapłonowej wykonany wg projektu autora, omówiony w rozdziale 4, pozwalający korygować przebieg prądu pierwotnego w zależności od prędkości obrotowej wału korbowego silnika, wykorzystując jedną z planowanych metod korekcji. Newralgicznymi okresami w pracy układu zapłonowego jest : rozruch zimnego silnika i duża prędkość obrotowa. W tych fazach pracy układu zapłonowego następuje obniżenie wartości maksymalnej przebiegów prądu pierwotnego  $i_1$  i w rezultacie wypadanie zapłonów lub brak zapłonu, zwłaszcza w starszych instalacjach zapłonowych. Głównym czynnikiem powodującym te problemy jest malejący czas zwarcia styków przerywacza zapłonu. W opisanym eksperymencie, autor próbował problemy te skorygować celem uniezależnienia przebiegów prądu w obwodzie pierwotnym od obrotów. Wartość końcowa prądu w obwodzie pierwotnym w czasie zwarcia komutatora wyraża się wzorem

$$i_1 \approx \frac{U}{R_p} \left( 1 - e^{-\frac{t_z}{\tau}} \right), \quad (5.1)$$

gdzie:

$U$  napięcie akumulatora,

$R_p$  rezystancja obwodu pierwotnego,

$t_z$  czas zwarcia komutatora zapłonu dla 4 cylindrowego silnika:

$$t_z = k \frac{120}{n_z}, \quad (5.2)$$

$$k \approx \frac{\alpha_z}{\alpha_z H \alpha_r}, \quad (5.3)$$

gdzie:

$\sim_z$  kąt zwarcia komutatora,

$\sim_r$  kąt rozwarcia komutatora, wartość  $k$  powinna wynosić ok. 0,6,

$\geq$  stała czasowa wynosząca:  $\geq Z \frac{L_1}{R_p} I$

$L_1$  indukcyjność obwodu pierwotnego,

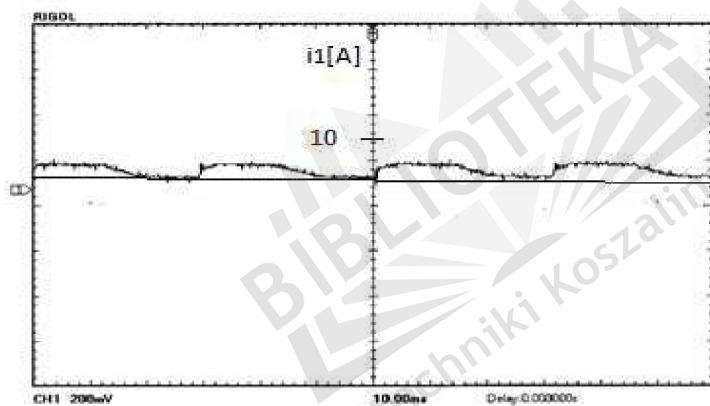
$n$  prędkość obrotowa,

$z$  liczba cylindrów.

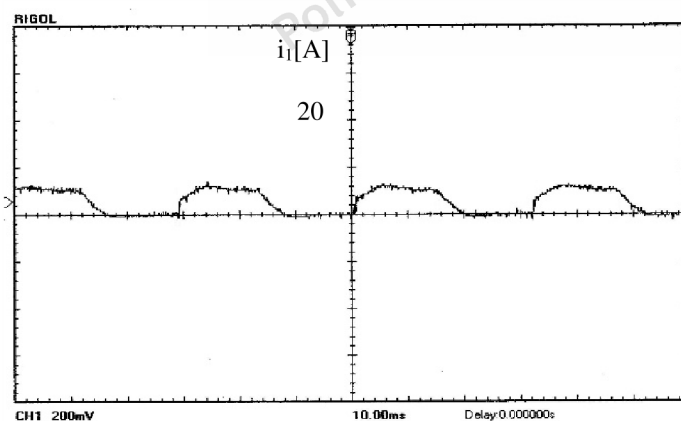
### Porównanie przebiegów prądu w obwodzie pierwotnym $i_1$ w bateryjnym układzie zapłonowym ze zmodyfikowanym układem zapłonowym

Modyfikacja układu zapłonowego polegała na zastosowaniu cewki zapłonowej z odczepami wyprowadzonymi z uzwojenia pierwotnego w miejsce cewki fabrycznej. Daje to możliwość wyboru parametrów uzwojenia pierwotnego cewki zapłonowej.

Dla prędkości  $n_1 \sim 1000$  obr./min.



a



b

Rys.5.15. Porównanie przebiegów prądu  $i_1$  w bateryjnym układzie zapłonowym: a) układ standardowy b) układ modyfikowany:  $L = 4,5$  mH

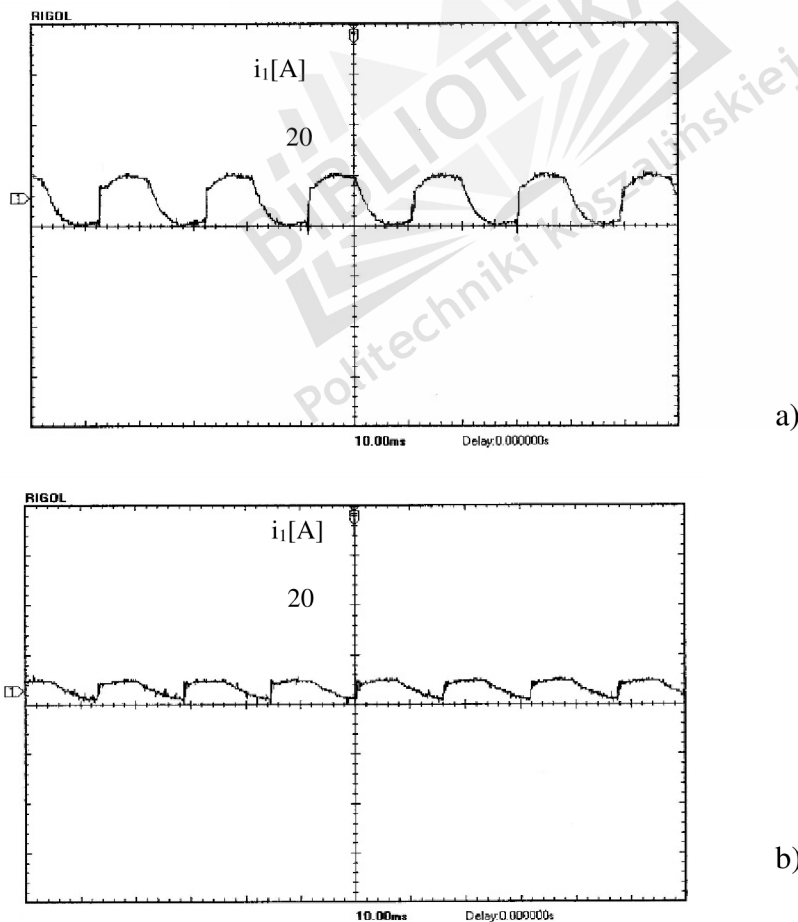
W przebiegach na rys.5.15 widać różnicę w amplitudach prądów. Prąd  $i_1$  w układzie zmodyfikowanym osiąga amplitudę o 22,5% większą od układu standardowego. Stromość zbocz w fazie przyrostu i zaniku prądu w tym układzie jest również większa.

Analiza zawartości harmoniczných w przebiegu prądu  $i_1$  dla prędkości 1000 [obr/min.]

W układzie standardowym przeważa grupa harmoniczných o częstotliwości ok. 32,5Hz i szerokości pasma ok.25Hz , pozostałe harmoniczne osiągają częstotliwości: 85Hz , 95Hz , 155Hz itd. Amplitudy wyższych harmoniczných osiągają ok. 25% wartości amplitudy harmonicznej podstawowej.

W układzie zmodyfikowanym przeważa pierwsza i druga harmoniczna o częstotliwości 32,5Hz oraz 100Hz. Szerokość częstotliwości z tych grup harmoniczných jest ok. dwukrotnie większa w porównaniu do poprzedniego przebiegu – załącznik nr1.

**Dla prędkości  $n \sim 2000$  [obr/min.]**



Rys.5.16. Porównanie przebiegów prądów  $i_1$  w baterijnym układzie zapłonowym dla  $n \sim 2000$  obr/min. : a) dla zapłonu standardowego , b) dla zapłonu zmodyfikowanego

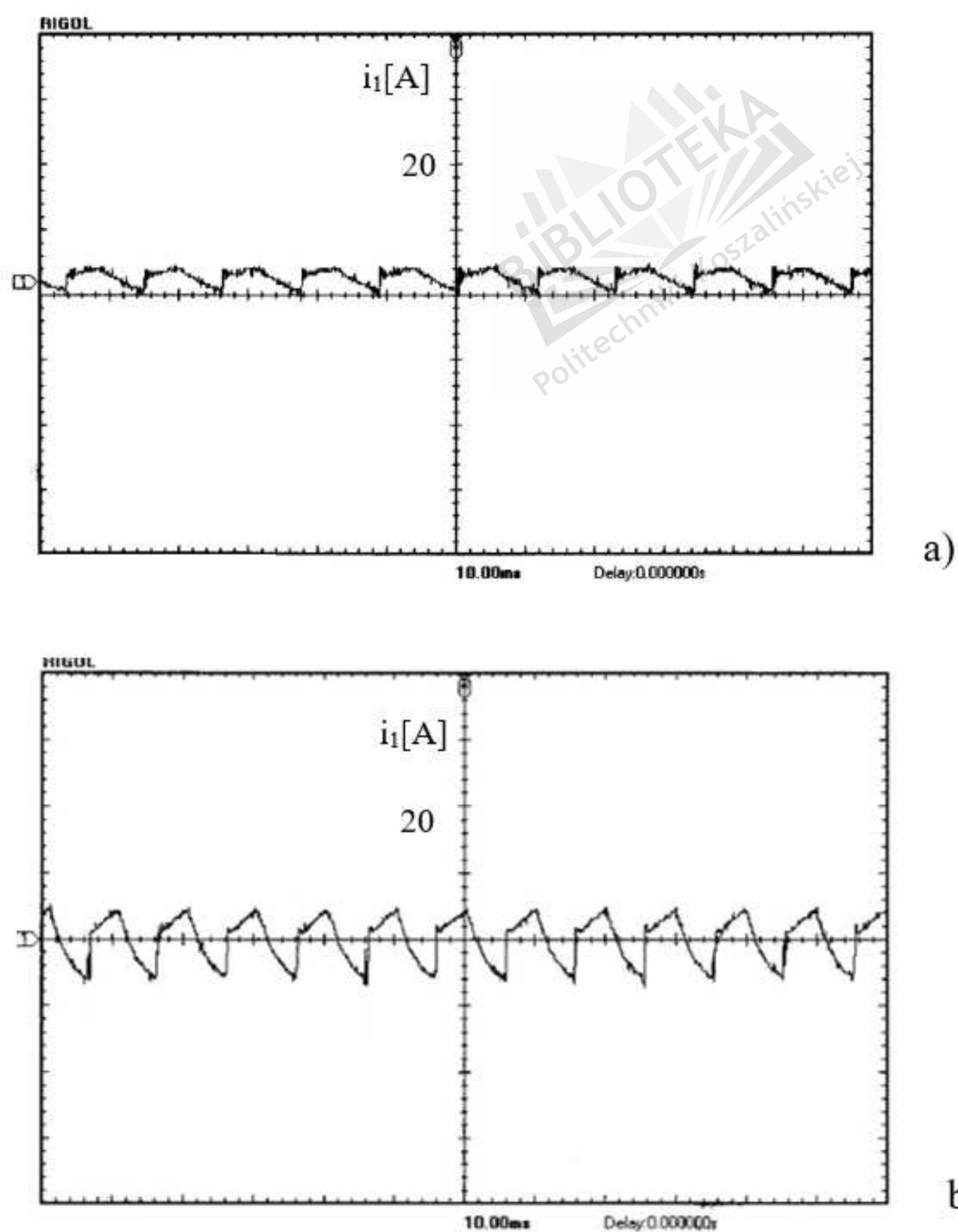
W układzie zmodyfikowanym prąd osiąga amplitudę większą o ok. 49% od układu standardowego. Automatycznie stromość zboczy: narastającego i opadającego jest odpowiednio większa.

#### Analiza zawartości harmonicznych

W układzie standardowym przeważają harmoniczne o szerokości pasma ok. 80Hz i częstotliwości 67,5Hz, wyższe harmoniczne mają częstotliwości 132Hz, 197Hz, 265Hz, 332Hz, 392Hz i większych.

W układzie zmodyfikowanym przeważa częstotliwość 55Hz o szerokości pasma ok. 87,5Hz, udział ma też harmoniczna 155Hz i 162Hz o amplitudach ok. 25% harmonicznej podstawowej. Wyższe harmoniczne mają małe znaczenie, gdyż największy wpływ na przebieg mają trzy pierwsze harmoniczne.

**Dla prędkości  $n \sim 3000$  [obr/min.]**



Rys.5.17. Porównanie przebiegów prądów  $i_1$  w baterijnym układzie zapłonowym dla  $n \sim 3000$ obr/min. a) układ standardowy b) układ zmodyfikowany



W układzie modyfikowanym amplituda osiąga wartość większą o 49% od układu standardowego. Prędkości narastania i zaniku zbczy prądu różne. Zbcza narastające i zanikające prądu pierwotnego układu skorygowanego są wyraźnie bardziej strome.

#### Analiza zawartości harmonicznych

W układzie standardowym przeważa harmoniczna o częstotliwości max. 92,5Hz i szerokości pasma ok. 27,5Hz. Wyższe harmoniczne mają częstotliwości odpowiednio: 182,5Hz, 272,5Hz, 362,5Hz, 445Hz, 547Hz i większych.

W układzie skorygowanym wyraźnie przeważa częstotliwość ok. 50Hz. Wyższe harmoniczne mają częstotliwości 110Hz i większe. Ich amplitudy wynoszą ok. 25% amplitudy harmonicznej podstawowej.

#### Podsumowanie rozdziału 5.5

W przedstawionych przebiegach widać wpływ wyższych harmonicznych na przebieg prądu w obwodzie pierwotnym  $i_1$  w klasycznym układzie zapłonowym. W fazie zwarcia styków komutatora zapłonu prąd narasta z mniejszą prędkością niż w układzie zmodyfikowanym. Podobne zjawisko zachodzi w fazie rozwarcia styków komutatora, kiedy prąd pierwotny zanika. W związku z tym strumień magnetyczny skojarzony z prądem pierwotnym ma mniejszą prędkość zaniku i gorsze warunki indukowania napięcia wtórnego zgodnie z równaniem:

$$e_L = Z \vartheta z \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{lub}$$

$$e_L = Z \vartheta L_1 \frac{di_1}{dt},$$

gdzie:  $\Phi$  jest to strumień magnetyczny skojarzony z prądem pierwotnym,

- $Z$  oznacza liczbę zwojów cewki indukcyjnej,
- $e_L$  jest to sem samoindukcji,
- $i_1$  oznacza prąd pierwotny,
- $d\Phi/dt$  oznacza prędkość zmian strumienia magnetycznego w czasie,
- $L_1$  indukcyjność własna.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że w układzie zapłonowym zmodyfikowanym warunki powstawania napięcia wtórnego uległy polepszeniu, ponieważ wzrosła wartość maksymalna prądu pierwotnego oraz wzrosła prędkość zmian

strumienia magnetycznego skojarzonego z prądem w obwodzie pierwotnym. Stwarza to nadzieję na poprawę działania bateryjnego układu zapłonowego. Autor widzi kilka wariantów możliwości modyfikacji parametrów elektrycznych bateryjnego układu zapłonowego bez istotnych zmian mechanicznych układu, przedstawionych w rozdziałach:2,4,5.6. Zdaniem autora należałoby przeprowadzić badania dla trzech wariantów parametrów eksploatacyjnych samochodu: - pod kątem najmniejszego zużycia paliwa / wariant ekonomiczny/,  
- pod kątem maksymalnej mocy/ wariant sportowy/,  
- pod kątem najmniejszej emisji toksycznych składników spalin/ wariant ekologiczny.

Realizacja wyżej wymienionych wariantów eksploatacji pojazdu polegałaby na doborze przekładni cewki zapłonowej i jej zmianie, dynamicznie w czasie jazdy.

Wymaga to jednak dalszych badań. Stwarza jednak nadzieję na szersze zastosowanie bateryjnego układu zapłonowego. Możliwe wydaje się również zastosowanie prototypów użytych w opisanym eksperymencie w elektronicznych układach zapłonowych.

W czasie rozwarcia komutatora, prąd pierwotny, wskutek zmiany struktury obwodu zanika oscylacyjnie pod warunkiem, że rezystancja obwodu pierwotnego jest większa od wartości rezystancji krytycznej.

W czasie rozwarcia komutatora następuje wymiana energii między indukcyjnością obwodu pierwotnego a pojemnością, reprezentowaną głównie przez kondensator przerywacza zapłonu. Jego pojemność powinna zawierać się w granicach: 0,05 - 0,25 $\mu$ F.

Pozostałe pojemności np. ekranowania przewodów posiadają niewielkie wartości.

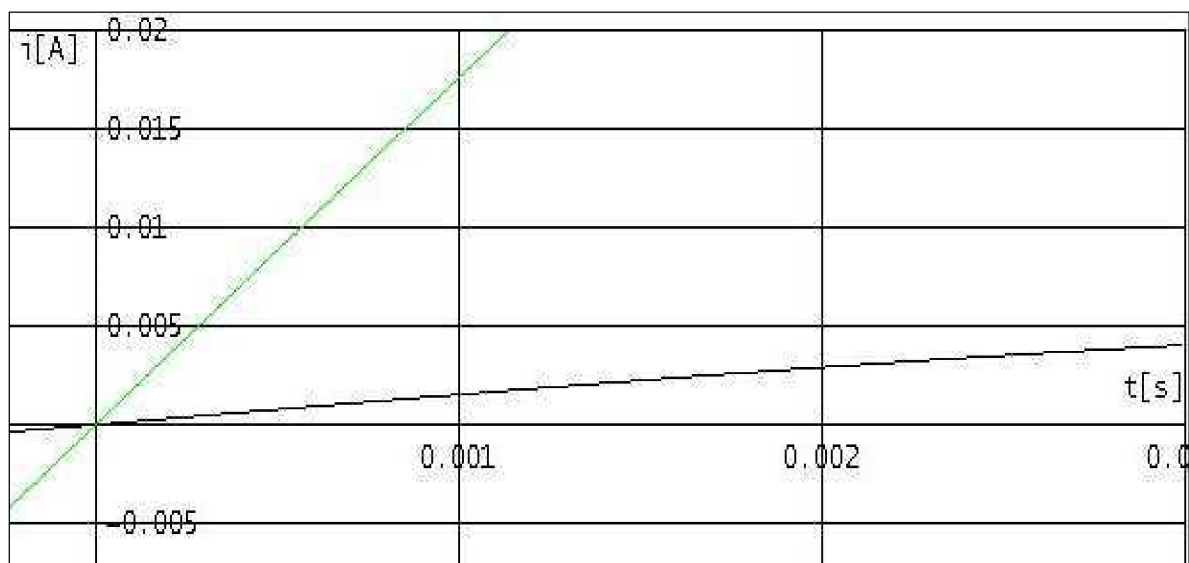
W wyniku tych zjawisk zanik prądu odbywa się oscylacyjnie. Można ustalić jedynie zakres tych oscylacji.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem prototypu zrealizowanego wg projektu autora /rozdział 4/, z wykorzystaniem oscyloskopu Rigol i jego oprogramowania.

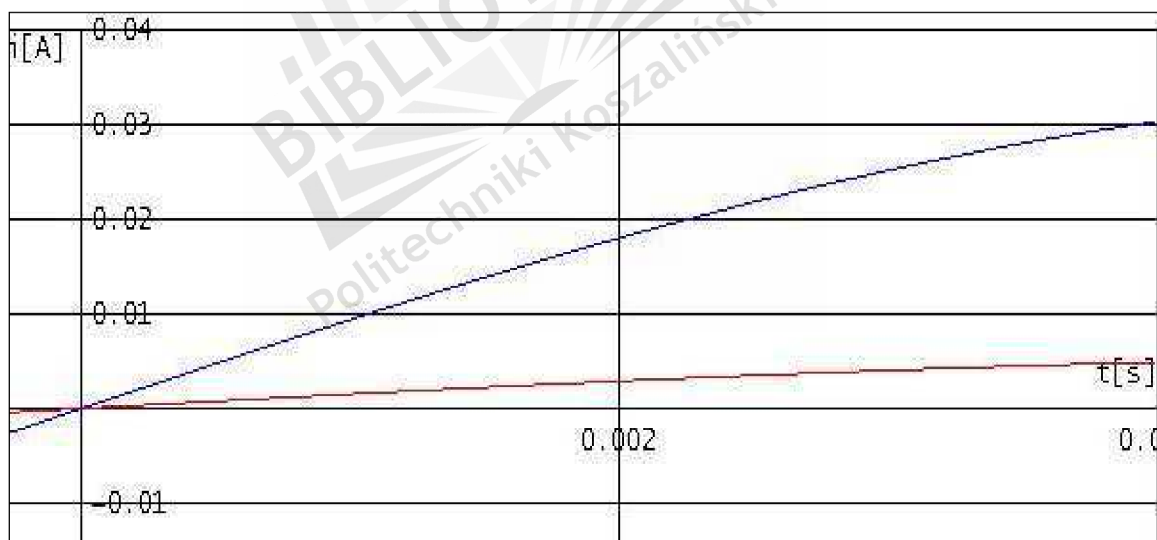
## **5.6. Wpływ rezonansu napięć na przebieg prądu w obwodzie pierwotnym**

W punkcie tym określono wpływ rezonansu napięć pierwotnych na przebieg prądu w obwodzie pierwotnym. Na rysunkach 5.18 i 5.19 pokazano, iż rezonans wpływa korzystnie na przebieg prądu. Powoduje szybszy narost prądu i większą jego amplitudę. Jest to zjawisko bardzo pozytywne i godne uwagi. Jednak ze względu na zmiany reaktancji elementów biernych w zależności od obrotów silnika stosowanie tego rozwiązania prowadziłoby do dużej

komplikacji układu sterującego procesem zapłonu. Z tego powodu wydaje się, iż stosowanie tego rozwiązania mimo obiecujących efektów może być bardzo uciążliwe.



Rys. 5.18. Przebieg prądu w obwodzie pierwotnym,  $n= 1000$  obr./min. dla rezonansu napięć dla 2 harmoniczej. Krzywa górna z rezonansem, dolna bez rezonansu



Rys. 5.19. Przebieg prądu w obwodzie pierwotnym,  $n= 1000$  obr./min., dla rezonansu napięć dla 3 harmoniczej. Krzywa górna z rezonansem, dolna bez rezonansu

Wyniki przedstawione na rys.5.18 i 5.19 wykonano na podstawie symulacji. Ze względu na zmienne warunki pracy pojazdu samochodowego w postaci dużych różnic temperatur, ciśnień otoczenia, przeciążeń powstałych od drgań mechanicznych, wpływu pól magnetycznych, nie przeprowadzono badań eksperymentalnych w zakresie praktycznego wykorzystania rezonansu napięć w obwodzie zapłonu.

## 6. WPŁYW POJEMNOŚCI OBWODU PIERWOTNEGO NA PRACĘ UKŁADU ZAPŁONOWEGO

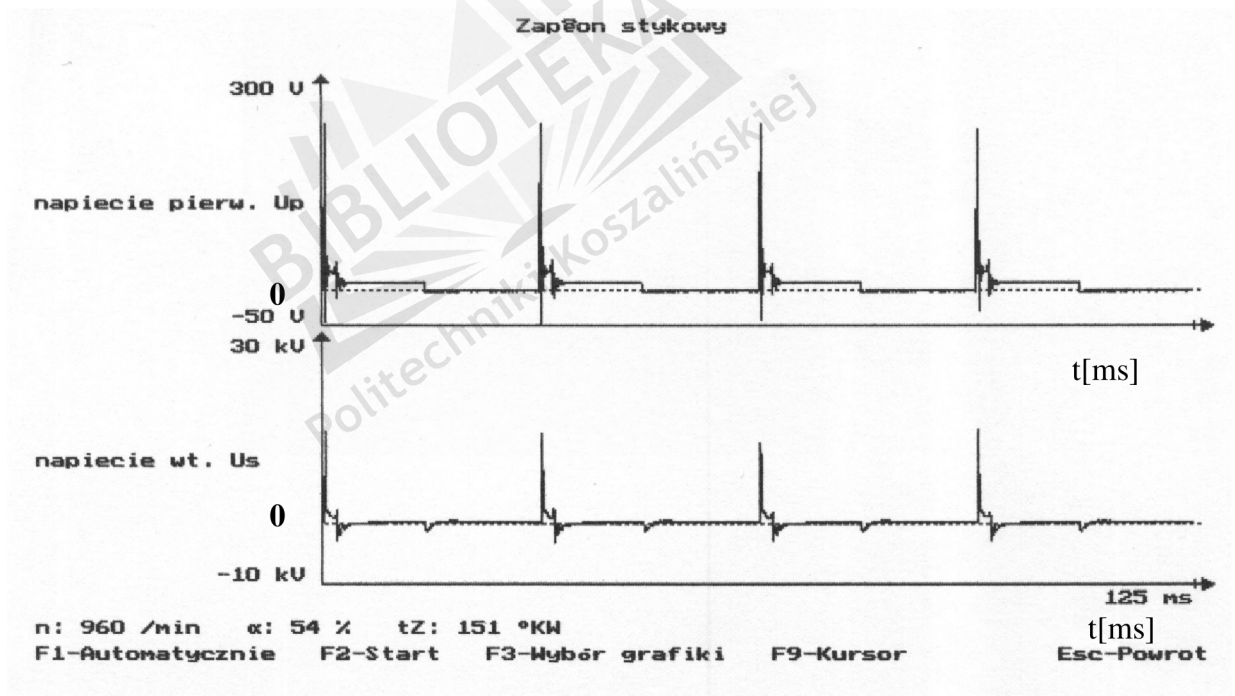
W eksperymencie tym sprawdzono jak wpływa zmiana pojemności na pracę układu zapłonowego i na jego parametry. Badania przeprowadzono na takim samym stanowisku jak podczas badania wpływu indukcyjności na układ zapłonowy.

**Przebieg napięcia pierwotnego i wtórnego dla prędkości  $n = 950 \pm 50$  obr/min.**

**Napięcie dla  $C = C_n$**

Gdzie:  $C_n$  pojemność znamionowa obwodu pierwotnego:  $C_n = 173,2 \text{ nF}$ .

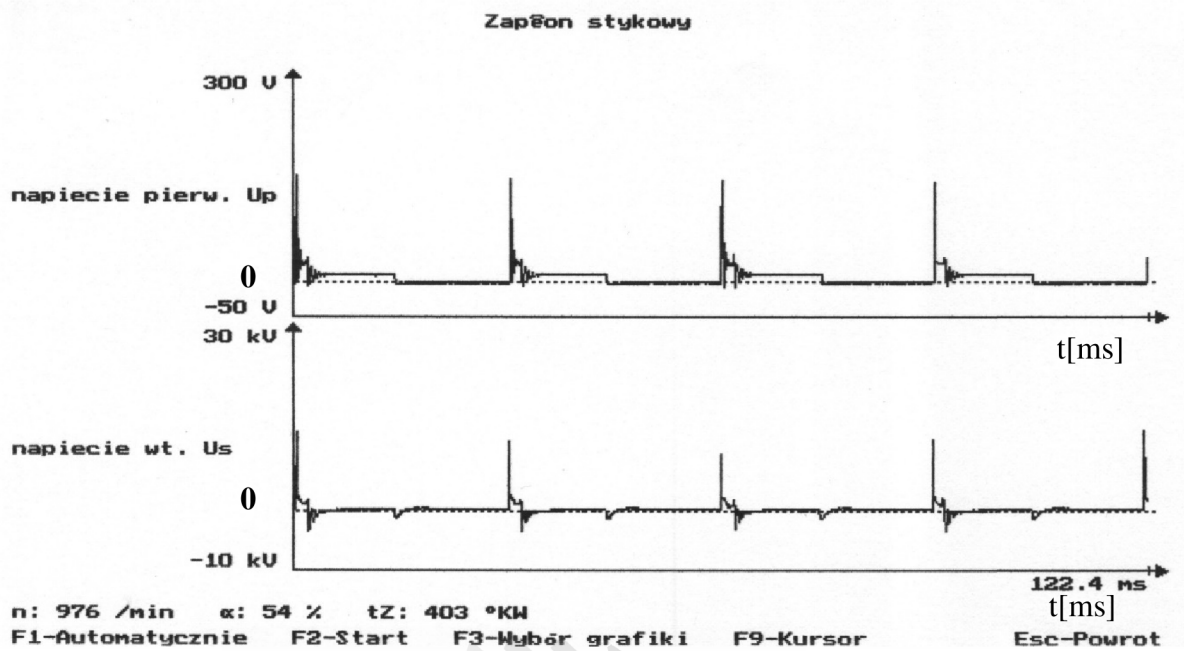
Jest to oscylogram dla pojemności równej  $C_n$ , bez pojemności dodatkowych. Napięcia: w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym ma typowy przebieg dla układu zapłonowego.



Rys. 6.1. Przebiegi napięć dla pojemności  $C$  równej znamionowej  $C_n = 173,2 \text{ nF}$

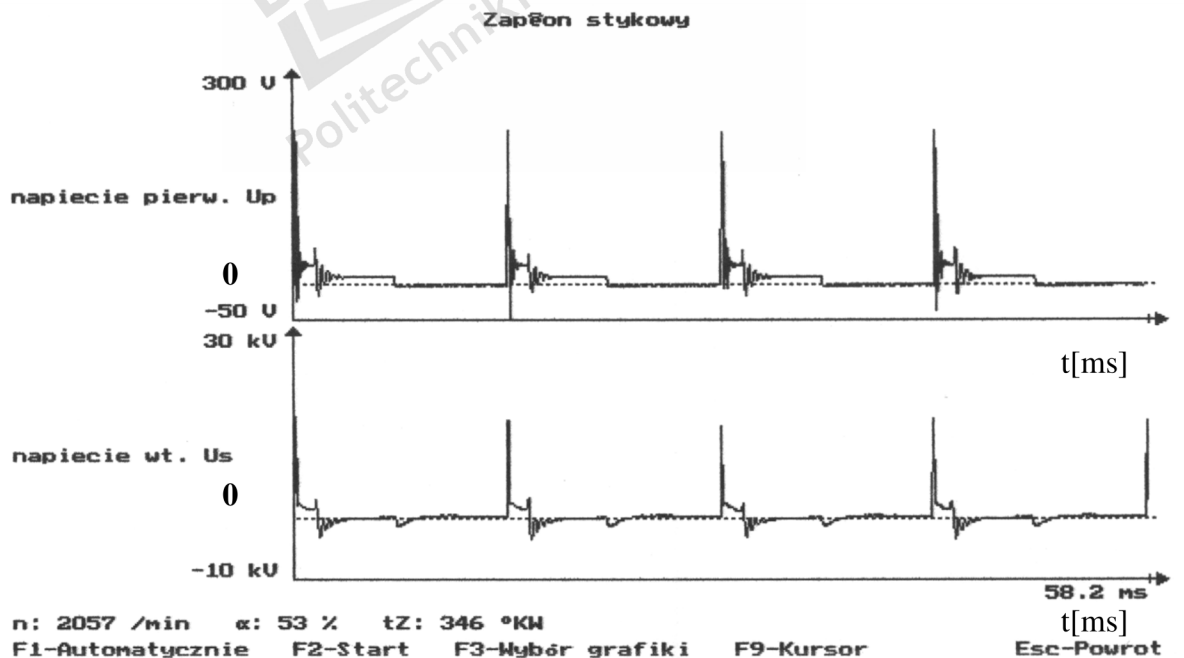
**Napięcie dla  $C = C_n + C_d$**

Gdzie:  $C_d$ : pojemność dodatkowa  $C_d = 173,2 \text{ nF}$ .



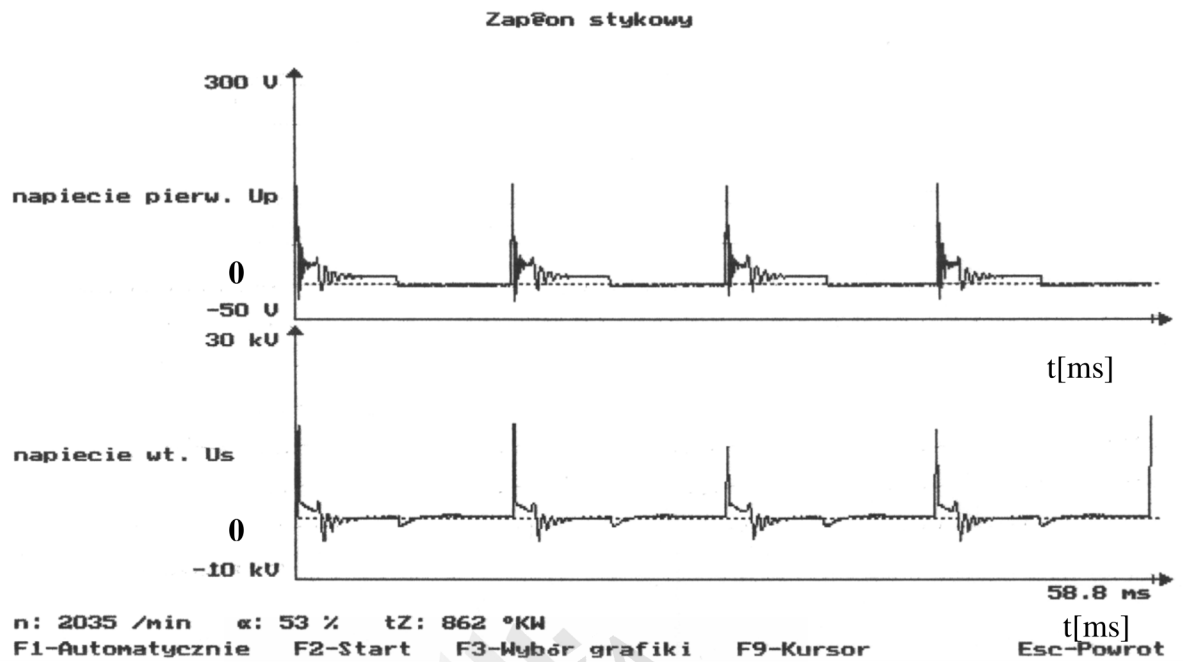
Rys. 6.2. Przebiegi napięć dla pojemności zwiększonej  $C = C_n + C_d = 346,4 \text{ nF}$   
 Na oscylogramach widać spadek wartości napięcia pierwotnego i wtórnego o ok.20%.

**Przebieg napięcia w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym dla  $n \sim 2000$  obr/min. dla pojemności znamionowej  $C = C_n$**



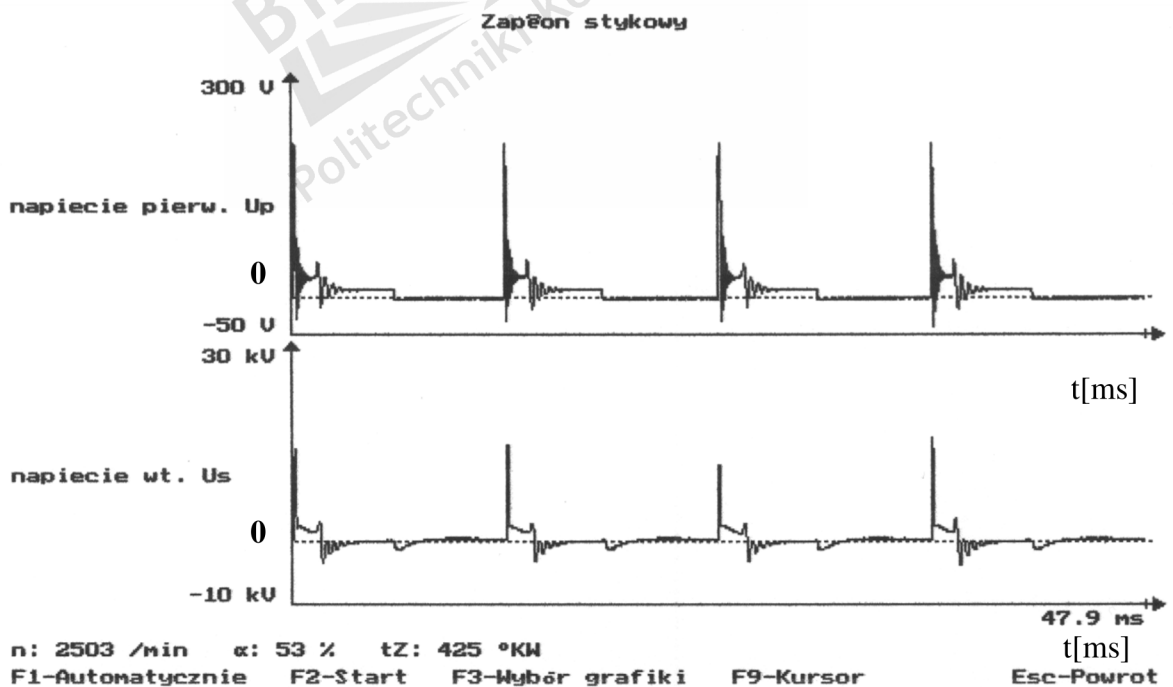
Rys. 6.3. Przebiegi napięć dla pojemności  $C$  równej znamionowej  $C_n$

## Napięcie dla pojemności zwiększonej $C = C_n + C_d$



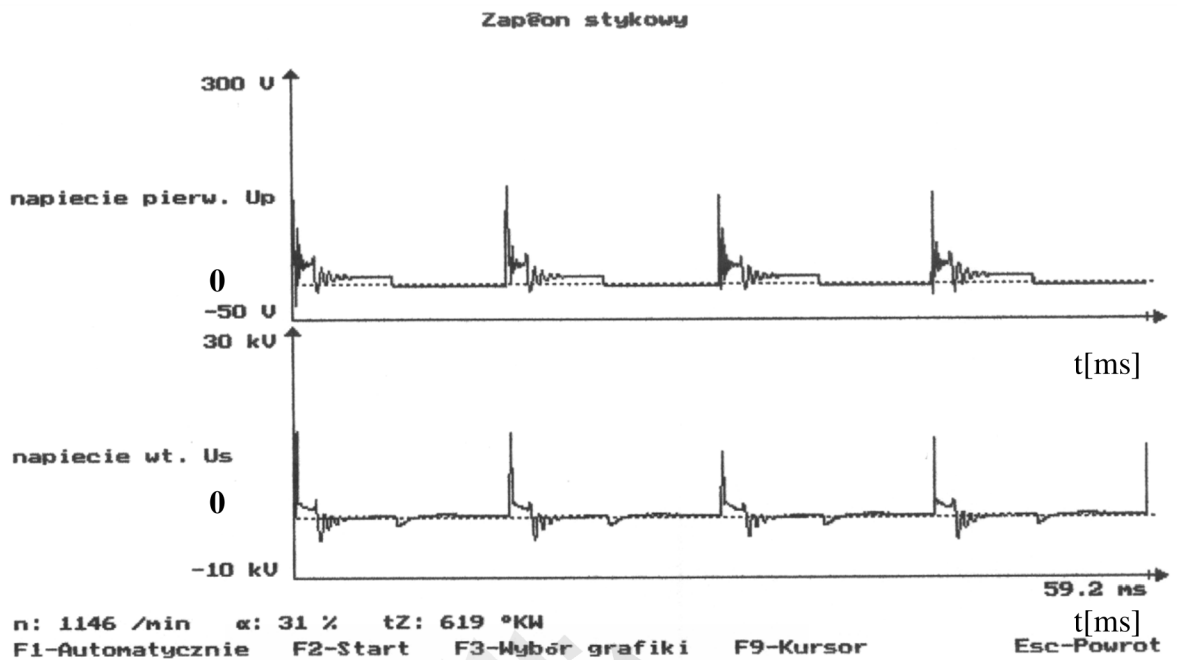
Rys. 6.4. Przebiegi napięć dla pojemności  $C$  zwiększonej  $C=C_n + C_d$

**Przebieg napięcia w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym  $n \sim 2500$  obr/min. dla pojemności znamionowej  $C = C_n$**



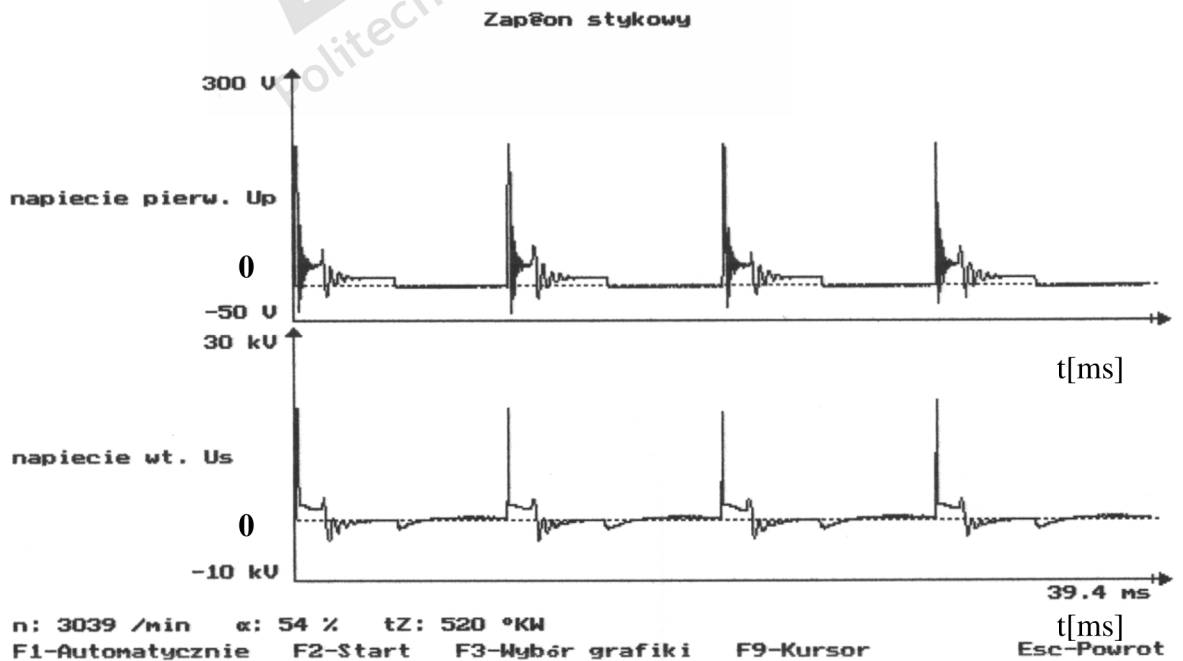
Rys. 6.5. Przebiegi napięć dla pojemności  $C$  równej znamionowej  $C_n$

## Napięcia dla pojemności zwiększonej $C = C_n + C_d$



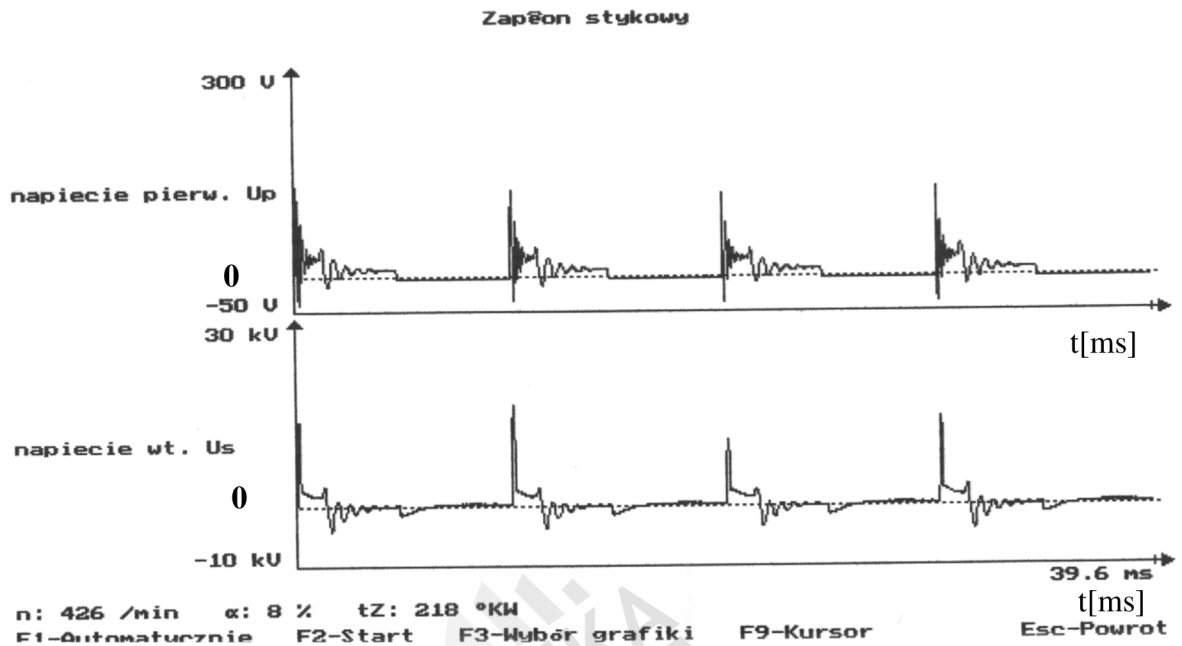
Rys. 6.6. Przebiegi dla pojemności  $C$  zwiększonej  $C = C_n + C_d$

## Napięcie pierwotne i wtórne dla $n \sim 3000$ obr/min. dla pojemności znamionowej $C = C_n$



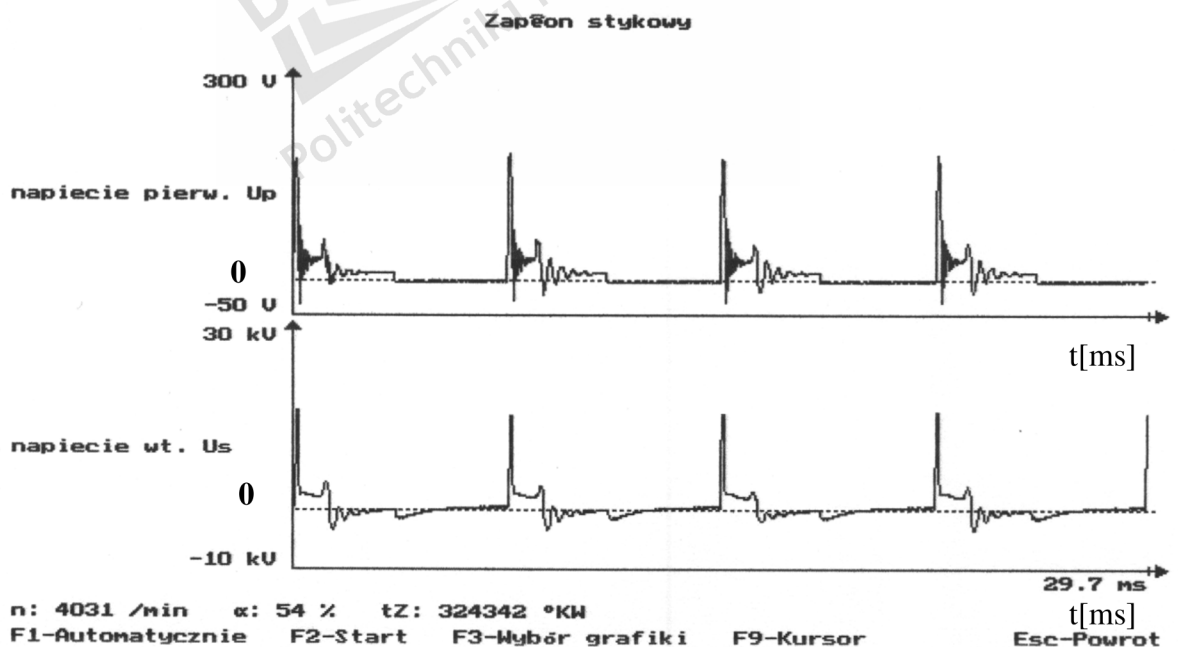
Rys. 6.7. Przebiegi dla pojemności  $C$  równej znamionowej

Napięcia dla pojemności zwiększonej  $C = C_n + C_d$



Rys. 6.8. Przebiegi napięć dla pojemności  $C$  zwiększonej  $C = C_n + C_d$

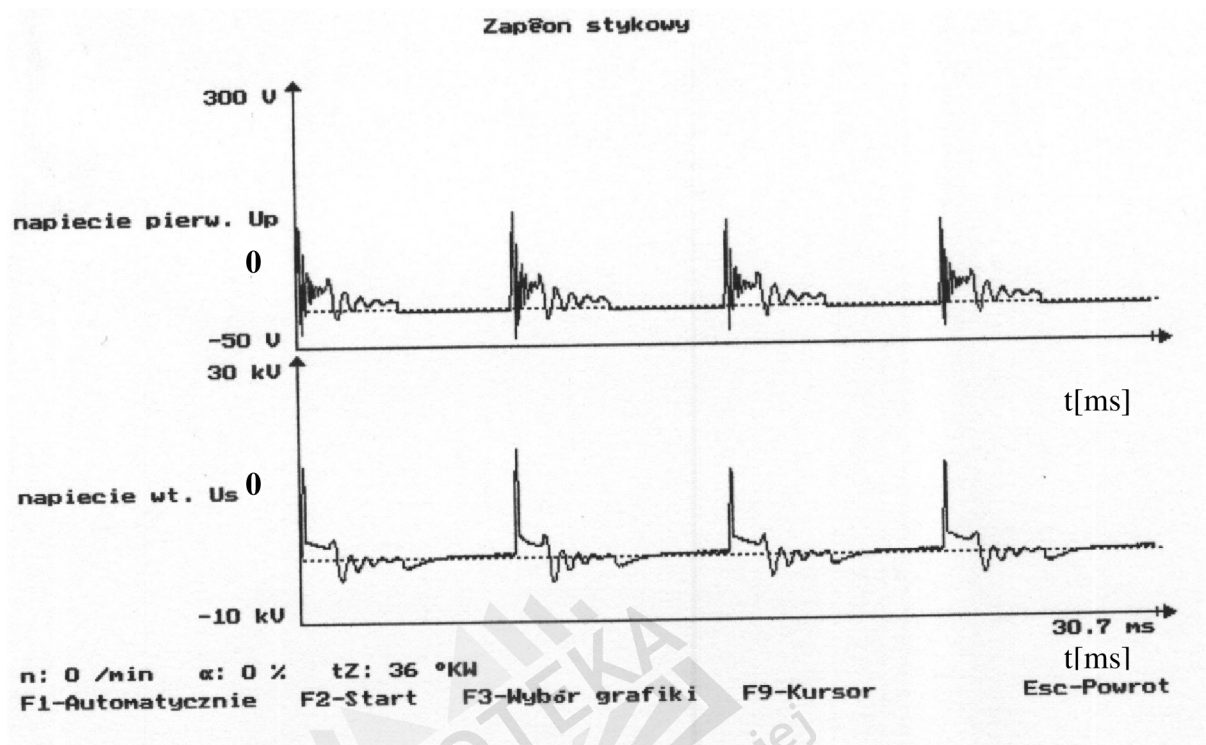
Napięcie pierwotne i wtórne  $n \sim 4000$  obr/min. dla pojemności znamionowej  $C = C_n$



Rys. 6.9. Przebiegi dla pojemności  $C$  równej znamionowej

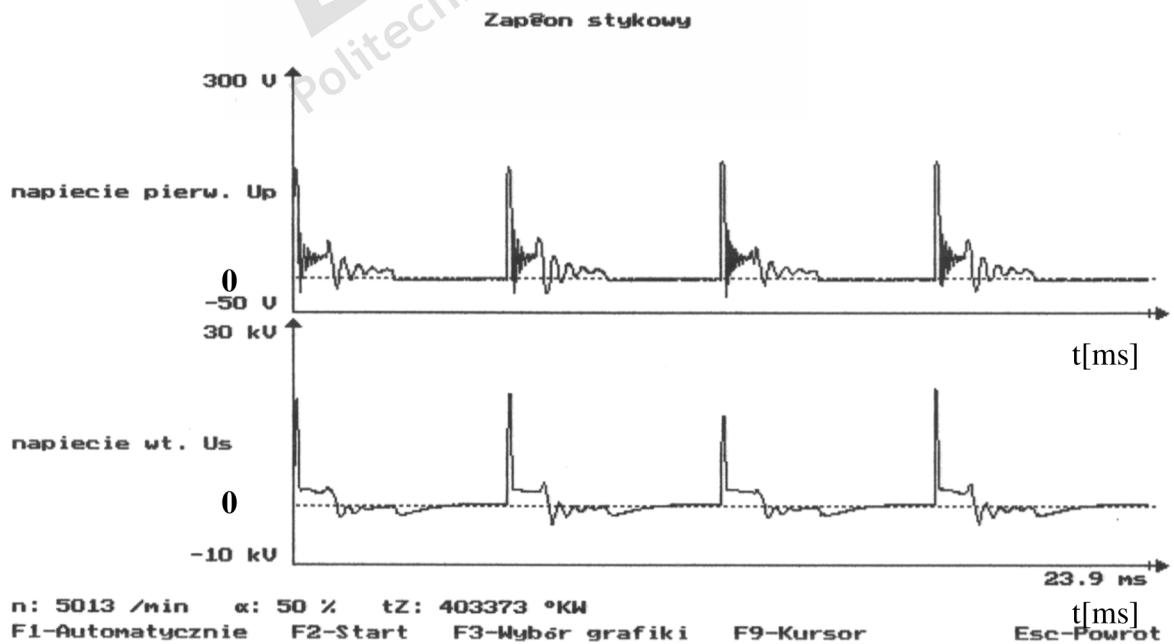


Napięcie dla pojemności  $C$  zwiększonej  $C = C_n + C_d$



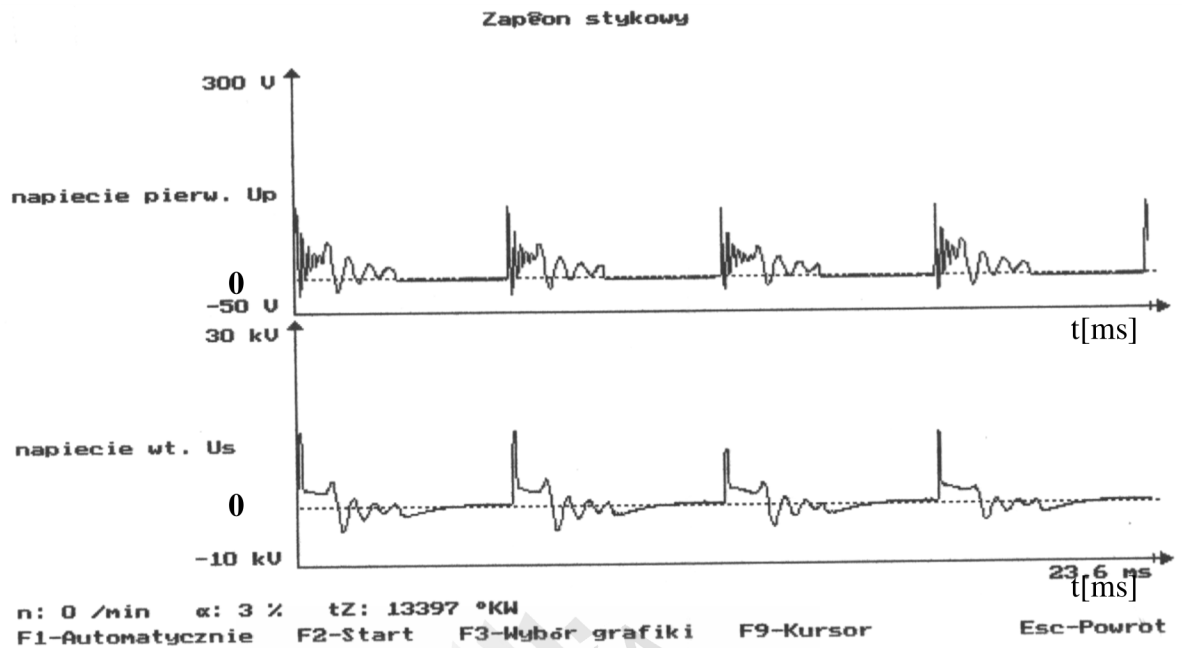
Rys. 6.10. Przebiegi dla pojemności  $C$  zwiększonej  $C = C_n + C_d$

Napięcia pierwotne i wtórne  $n = 5000$  obr/min. dla pojemności znamionowej  $C = C_n$



Rys. 6.11. Przebiegi dla pojemności  $C$  równej znamionowej

## Napięcie dla pojemności C zwiększonej $C = C_n + C_d$

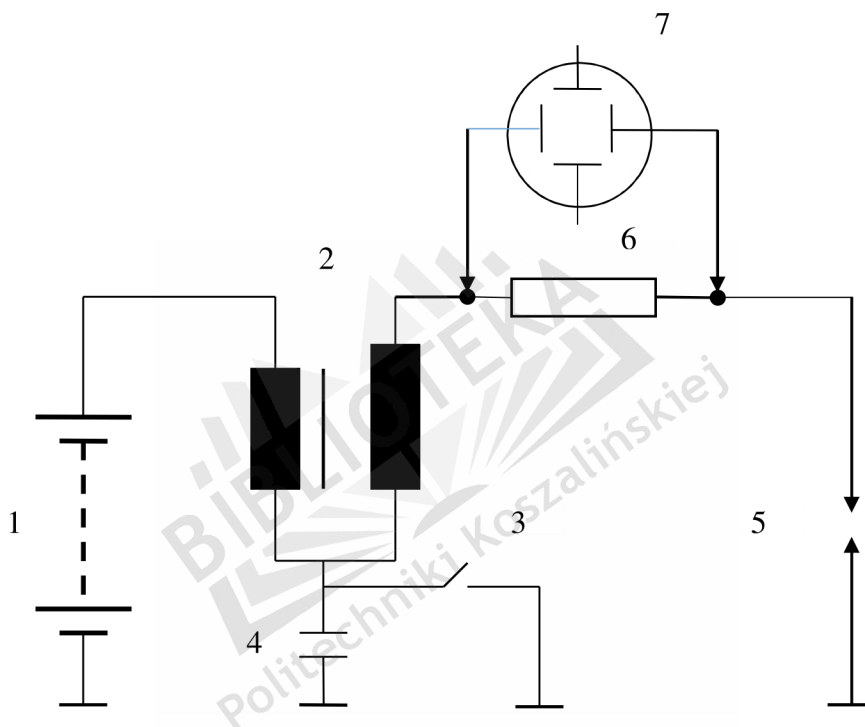


Rys.6.12. Przebiegi dla pojemności C zwiększonej  $C = C_n + C_d$

Z powyższych pomiarów wynika, iż pojemność obwodu pierwotnego powinna zawierać się w określonych granicach. W miarę wzrostu prędkości obrotowej wału korbowego, wartość napięcia pierwotnego i wtórnego ulega systematycznemu obniżeniu. Przebiegi obu napięć przechodzą w oscylacje po zwiększeniu wartości pojemności, szczególnie po osiągnięciu prędkości obrotowej  $n = 3000$  obr/min. i wyższej. W przebiegach pojawiają się wyższe harmoniczne prowadzące do zniekształcenia kształtu napięcia pierwotnego i wtórnego. Zjawisko takie może prowadzić do zaburzenia procesu spalania mieszanki w silniku, spadku mocy i sprawności oraz wzmożonej emisji toksycznych składników zawartych w spalinach.

## 7. ANALIZA STATYSTYCZNA PRZEBIEGÓW PRĄDU ISKRY

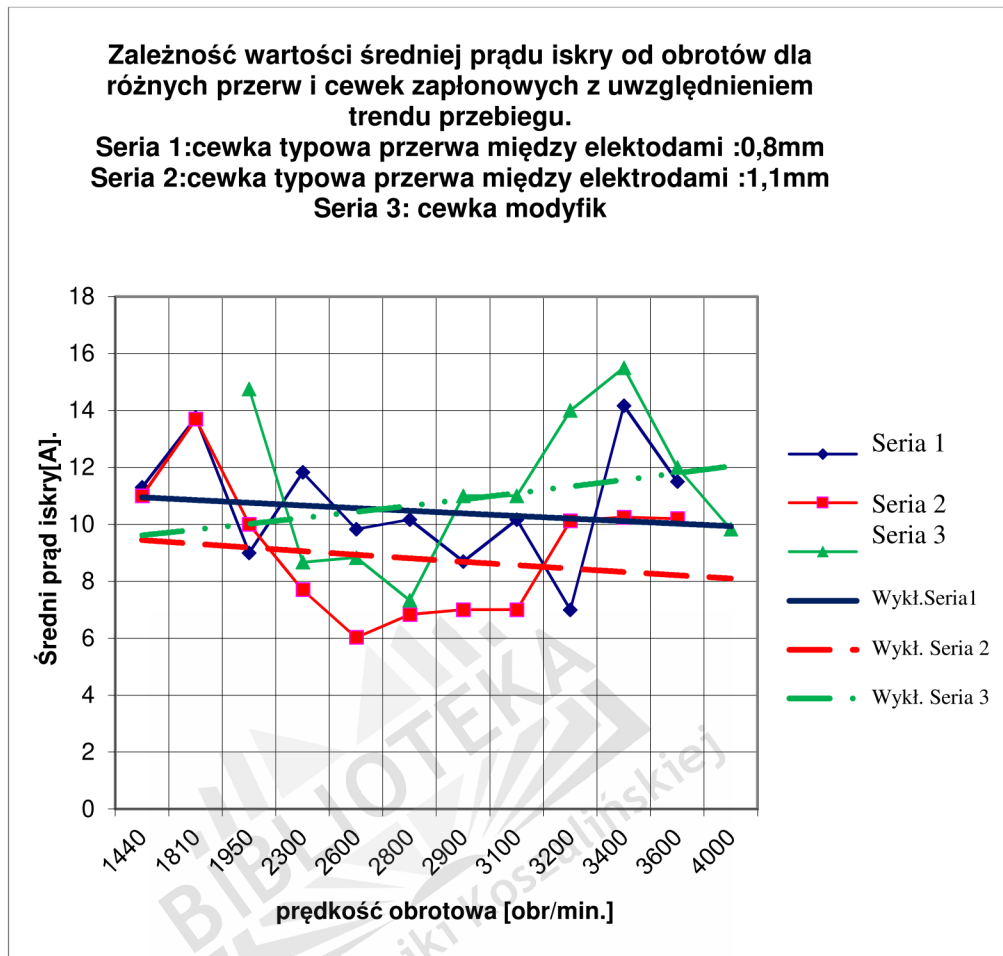
Pomiaru prądu iskry dokonano poprzez pomiar napięcia na specjalnym przewodzie zapłonowym za pomocą oscyloskopu. Przewód ten służy do wyznaczania prądów iskry. Pełni rolę rezystora bezindukcyjnego. Na schemacie został oznaczony jako rezystor. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 7.1.



Rys.7.1. Schemat układu pomiarowego prądu iskry

gdzie: 1 akumulator,  
2 cewka zapłonowa,  
3 zespół komutatora lub nadajnik impulsów zapłonowych,  
4 pojemność obwodu pierwotnego,  
5 świeca zapłonowa,  
6 przewód wysokiego napięcia, wykonany w postaci rezystora pomiarowego,  
7 oscyloskop.

## 7.1. Wartość średnia prądu iskry

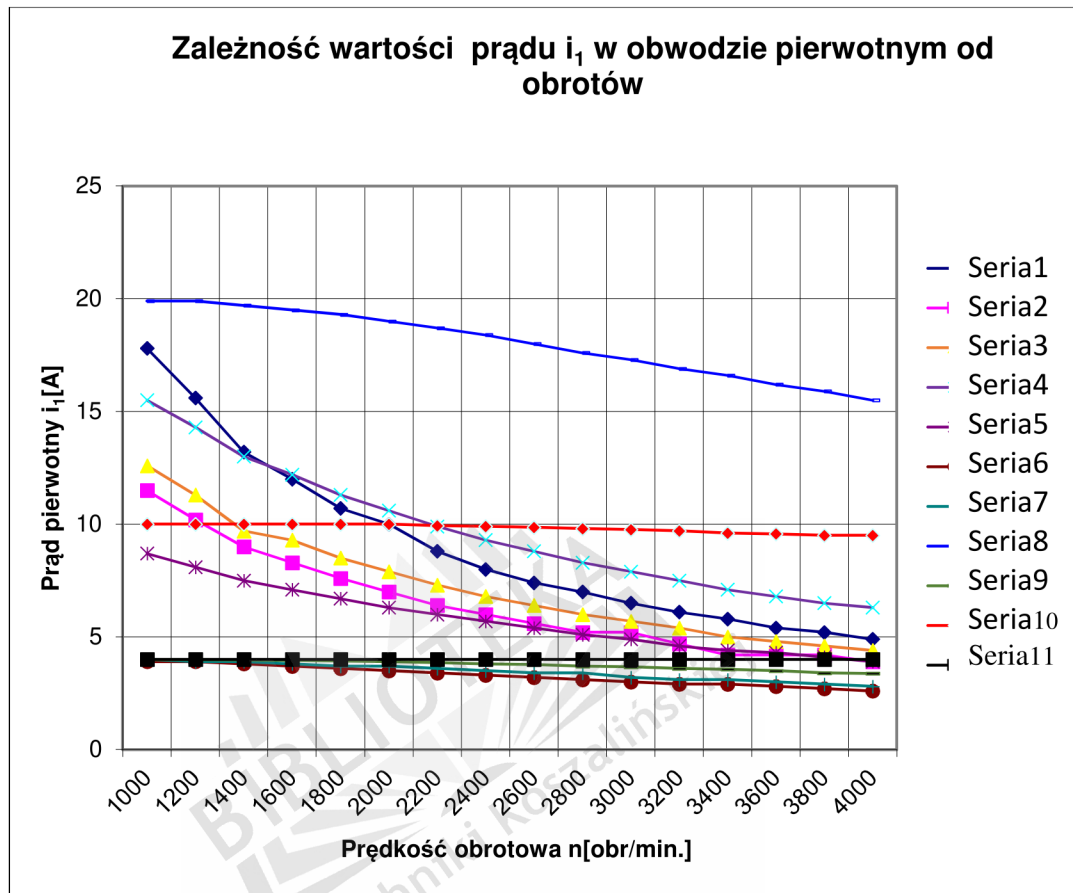


Rys.7.2. Zmienność wartości średniej prądu iskry zapłonowej dla układu zapłonowego standardowego i modyfikowanego wraz z liniami trendu

Na powyższym rysunku widać tendencję / trend/ rosnącej wartości prądu iskry świecy zapłonowej pomimo wzrostu prędkości obrotowej silnika układu zapłonowego modyfikowanego poprzez zmianę przekładni cewki zapłonowej. Daje to wzrost energii iskry, co widać na wykresie /seria 3/. Dla porównania energia iskry zapłonu klasycznego, zgodnie z założeniami teoretycznymi, maleje /seria 1/, gdyż czas zwarcia komutatora zapłonu maleje, w miarę wzrostu prędkości obrotowej / rysunek 7.2/, powodując osiągnięcie mniejszej wartości prądu pierwotnego. W konsekwencji zgodnie z wzorem: (2.1), wpływa to na wartość napięcia wtórnego i niższą wartość prądu iskry i jej energii. Potwierdza to linia trendu zapłonu klasycznego.

## 7.2. Przebieg prądu w obwodzie pierwotnym

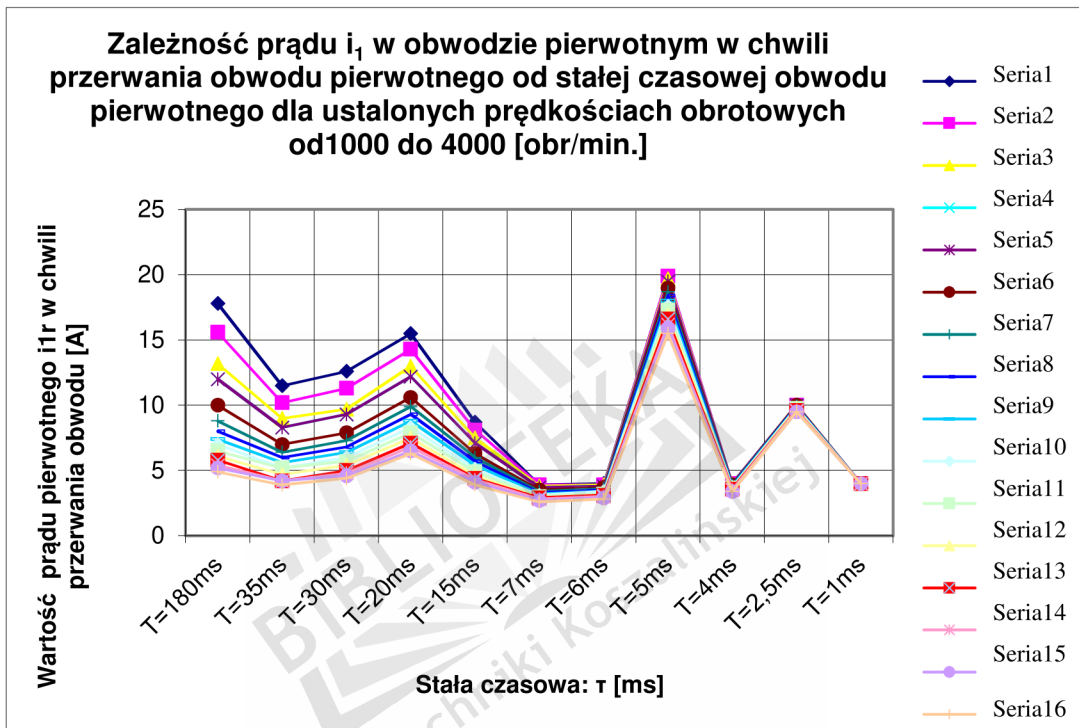
W punkcie tym przeprowadzono symulacje przebiegu prądu w obwodzie pierwotnym w zależności od stałych czasowych i prędkości obrotowej.



Rys.7.3. Zależność wartości końcowej prądu w obwodzie pierwotnym  $i_1$  w funkcji obrotów, dla różnych stałych czasowych obwodu pierwotnego

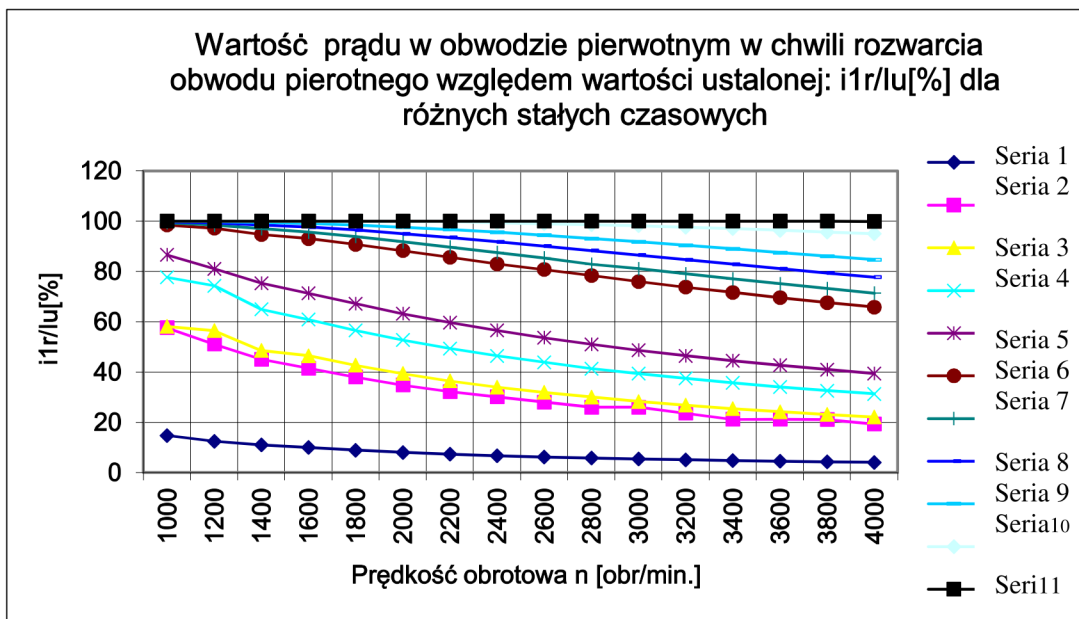
Na powyższym rysunku przedstawiono zależność wartości rozwarcia komutatora prądu w obwodzie pierwotnym, od prędkości obrotowej silnika pojazdu samochodowego, dla różnych stałych czasowych, zawierających się w granicach od 180 ms do 1ms / załącznik: tabela 1 /. Jak widać na wykresach, w miarę wzrostu prędkości obrotowej, maleje wartość końcowa prądu w chwili rozwarcia komutatora. Zakres zmian zależy od stałej czasowej obwodu pierwotnego. Dla największych wartości stałej czasowej tj.  $\tau = 180$  ms / seria 1/ prąd zmienia się od 17,7A do 4,92A w zależności od obrotów tj. czasu zwarcia komutatora. Wartość przerwania obwodu pierwotnego prądu maleje wykładniczo. Taką tendencję widać do wartości stałej czasowej  $\tau = 15$  ms / seria 5/. Dla mniejszych stałych czasowych:  $\tau = 7$  ms / seria 6/ zmiana prądu wykazuje mniejsze różnice co do wartości w całym zakresie prędkości obrotowych. Z powyższych rozważań wynika, iż najlepsze własności wykazują obwody

pierwotne o stałej czasowej  $\tau = 2,5 \text{ ms}$ / seria10/. Dla takiej stałej czasowej prąd osiąga stosunkowo wysokie wartości i wykazuje dużą niezależność od obrotów, gdyż zmienia się jedynie o około 0,5A, w całym zakresie prędkości. Powyższe tendencje widać w układach zapłonowych elektronicznych, w których obwody pierwotne mają podobne stałe czasowe. Przy najmniejszych stałych czasowych prąd w obwodzie pierwotnym wykazuje stabilność lecz osiąga małe wartości, które obniżyłyby energię iskry.



Rys.7.4. Wykres zależności wartości prądu w obwodzie pierwotnym  $i_r$  w chwili przerwania /rozwarcia komutatora/ obwodu pierwotnego od stałej czasowej  $\tau$  przy ustalonych obrotach

Na rysunku 7.4 przedstawiono zmiany wartości prądu w obwodzie pierwotnym w chwili przerwania obwodu pierwotnego, w funkcji stałych czasowych przy ustalonych obrotach. Poszczególne serie pomiarowe przedstawiają zmienność prądu dla obrotów od 1000 do 4000 obr/min. co 200 obr/min. Otrzymano odpowiednio: seria 1 odpowiada  $n = 1000$  obr/min. itd. do seria 16 odpowiada  $n = 4000$  obr/min./ załącznik: tabela 2 /. Rozpatrując przebiegi dla poszczególnych stałych czasowych i prędkości, największą niezależność od obrotów widać dla  $\tau = 6 \text{ ms}$ ,  $4 \text{ ms}$ ,  $2,5 \text{ ms}$ ,  $1 \text{ ms}$ , dla całego zakresu prędkości obrotowych. Wartości te potwierdzają się w praktycznych zastosowaniach.



Rys.7.5. Wykres wartości prądu w obwodzie pierwotnym  $i_1$  w chwili rozwarcia komutatora względem wartości ustalonej dla stałych czasowych przy ustalonych obrotach

Rysunek przedstawia zmienność wartości końcowej prądu w obwodzie pierwotnym w stosunku do wartości ustalonej wyrażoną w procentach w funkcji prędkości obrotowej. Seria 1 pomiarowa odpowiada stałej czasowej  $\tau = 180$  ms i odpowiednio kolejnym stałym czasowym do  $\tau = 1$  ms dla seri 11. Z analizy wykresów wynika, że zgodnie z oczekiwaniami najmniejszą zmienność wykazują prądy o małej stałej czasowej. Zmienność prądu dla stałej czasowej  $\tau = 1$  ms mieści się w granicach 1% w całym zakresie prędkości obrotowych, podczas gdy prąd dla  $\tau = 180$  ms zmienia się w przedziale około 10%. Wyniki te potwierdzają własność stałej czasowej, która wpływa na prędkość zmian prądu, wzór (2.1). Własność tą wykorzystano do budowy cewek zapłonowych układów sterowanych elektronicznie, gdzie stałe czasowe zawierają się w przedziale kilku milisekund.

Stała czasowa jest stosunkiem indukcyjności do rezystancji. Jest syntetycznym wskaźnikiem dynamiki obwodu. Dla dużych wartości indukcyjności i dużych rezystancji może osiągać małe wartości. Sugerowałoby to, iż prąd szybko narodzi się i szybko zaniknie. Jednak bez analizy wartości składników stałej czasowej można wyciągnąć mylne wnioski. Duża indukcyjność obwodu spowoduje duży czas ustalania prądu, a duża rezystancja małą wartość ustaloną prądu.

### 7.3. Analiza statystyczna wyników pomiarów natężenia prądu iskry

W tabeli 7.1 zamieszczono wyniki pomiarów średnich wartości natężenia prądu iskry zapłonowej dla różnych prędkości obrotowych i różnych przerw między elektrodami świec zapłonowych. Wartości prądu wyznaczono na stanowisku pomiarowym zgodnie z rys, 7.1.

#### Natężenie prądu iskry dla różnych obrotów

Tabela nr 7.1

Obroty[obr/min]	Średni prąd iskry, wartość max.[A] cewka typowa, przerwa 0,8mm	Średni prąd iskry, wart. max. [A] cewka typowa, przerwa 1,1mm	Średni prąd iskry wart. max.[A] cewka modyfikowana przerwa 1,1mm
1440	11,3	11	12,5
1810	13,75	13,7	14
1950	9	10	14,74
2300	11,8	7,7	8,67
2600	9,3	6,025	8,83
2800	10,2	6,8	7,33
3000	8,7	7	11
3100	10,2	7	11
3200	7	10,125	14
3400	14,7	10,25	15,5
3600	11,5	10,2	12
4000	7	8	9,83

#### Mediana prądu iskry czyli kwartył drugi $Q_2$

Dla szeregu rozdzielczego punktowego [25]:

$$Me = \frac{x_{NHI}}{2}, \quad \text{gdy } N \text{ nieparzyste,} \quad (7.1)$$

lub

$$Me = \frac{x_N}{2} H \frac{x_{NHI}}{2}, \quad \text{gdy } N \text{ parzyste.}$$



Przykładowo dla cewki prąd iskry zapłonowej :

- cewka o fabrycznych, niezmienionych, parametrach, przerwa 0,8 mm:

$$i_i = \begin{bmatrix} 11,5 \\ 14 \\ 13 \\ 15,5 \end{bmatrix}$$

$n = 3600$  [obr/min.],

$N = 4$ ,/ liczba pomiarów/,

$M_e = 13,5A$ .

Wynik ten oznacza, że wartością środkową pomiarów jest 13,5A co w stosunku do wartości średniej jest wynikiem nieco wyższym. Połowa amplitud prądu nie osiąga wartości mediany.

Dla cewki o parametrach fabrycznych, przerwa 0,8 mm, dla 3000 [obr/min.] uzyskano:

$x_i$ [A]	12,5	7	6,5	7,5	8
$n_i$	2	2	2	2	2

Dla cewki modyfikowanej / z odczepami/, przerwa 1,1mm, dla 3000 [obr/min] uzyskano:

$y_i$ [A]	15,5	10,5	7	11	13
$n_i$	2	2	2	2	2

gdzie:  $x_i, y_i$  oznaczają amplitudy prądów iskry,

$n_i$ , oznacza liczebność próbek,

wartość przeciętna:  $EX = Z \sum_{i=1}^n x_i p_i$ , (7.2)

gdzie:  $p_i$ : prawdopodobieństwo przyjmowania określonej wartości.

Dla cewki typowej wartość przeciętna EX wynosi:

$EX = 8,3A$ .

Dla cewki modyfikowanej wartość przeciętna EY wynosi:

$EY = 11,4A$ .

Otrzymane wyniki świadczą o lepszych parametrach układu zapłonowego modyfikowanego.

Zgodnie z pozycją [25] wariancję wyznacza się ze wzoru:

$$D^2 X = \sum E^2 X.$$

Wariancja prądu cewki typowej wynosi:

$$D^2 X = 12,5^2 * 0,2 + 7^2 * 0,2 + 6,5^2 * 0,2 + 7,5^2 * 0,3 + 8^2 * 0,2 = 8,3^2 = 4,66 A.$$

Wariancja prądu dla cewki modyfikowanej wynosi:

$$D^2 Y = 15,5^2 * 0,2 + 10,5^2 * 0,2 + 7^2 * 0,2 + 11^2 * 0,2 + 13^2 * 0,2 = 8,3 A.$$

Otrzymano więc:  $D^2 Y > D^2 X$ .

Dla szeregu rozdzielczego punktowego według pozycji [25] odchylenie standardowe wynosi:

$$\sigma = \sqrt{D^2 X}.$$

(7.3)

Dla cewki klasycznej:

$$\sigma = 2,16 A.$$

Dla cewki modyfikowanej:

$$\sigma = 2,88 A.$$

Zarówno wariancja jak i odchylenie standardowe prądu iskry w zapłonie zmodyfikowanym przyjmują większe wartości niż dla układu klasycznego.

Współczynnik zmienności prądu iskry określa wzór (7.4):

$$V_s = \frac{S}{x} * 100, \quad (7.4)$$

gdzie: S oznacza odchylenie standardowe.

Dla cewki klasycznej, przyjmując poprzednie parametry:

$$V_s = 26,02\%.$$

Dla cewki modyfikowanej:

$$V_s = 25,26\%.$$

Obie wartości wykazują średnią zmienność statystyczną, co wskazuje iż wartość średnia dobrze charakteryzuje wartości prądów. Współczynnik zmienności wyników uzyskanych dla cewki zmodyfikowanej, jest nieco mniejszy, niż pomiarów uzyskanych dla cewki standardowej.

## Miary koncentracji – moment czwarty centralny standaryzowany

Dla szeregu rozdzielczego punktowego natężenia prądu pierwotnego miara koncentracji wynosi:

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^4 n_i}{N} \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^k E_i \bar{x} \Phi_i}{N} \right)^4. \quad (7.5)$$

Po obliczeniach dla cewki typowej miara koncentracji wynosi:  $M_4 = 2,991$ .

Dla cewki modyfikowanej miara koncentracji wynosi:  $M_4 = 2,108$ .

Dla  $M_4 < 3$  można określić rozkład statystyczny prądu jako spłaszczony, czyli koncentracja wartości amplitudy prądu iskry wokół wartości średniej jest mniejsza niż w rozkładzie normalnym, przy czym koncentracja dla cewki klasycznej odbiega od rozkładu normalnego w niewielkim stopniu.

Świadczy to o większej stabilności pracy układu zapłonowego modyfikowanego w szerszym zakresie prędkości obrotowych. Można wywnioskować, iż jest to spowodowane wyższymi wartościami średnimi prądu w obwodzie pierwotnym układu zapłonowego z regulacją indukcyjności.

### Zależność stochastyczna między amplitudą prądu iskry zapłonowej a przerwą między elektrodami świec zapłonowych

W punkcie tym autor sprawdził zależność występującą między amplitudą prądu iskry zapłonowej a przerwą między elektrodami świecy zapłonowej. Zależność zostanie zbadana za pomocą współczynnika korelacji Pearsona.

W tym celu przyjęto rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej dwuwymiarowej: gdzie: X jest zmienną losową tj. amplitudą prądu iskry dla przerwy między elektrodami świecy zapłonowej 0,8mm,

Y jest zmienną losową tj. amplitudą prądu iskry dla przerwy 1,1mm.

Zgodnie z pozycją [25] zależność stochastyczna wynosi :

$$r_{xy} = r_{yx} = \frac{C(X,Y)}{S_y S_x} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{E_{ij} \bar{x}_i \bar{y}_j}{N}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{E_{ij} \bar{x}_i^2}{N}} \sqrt{\sum_{j=1}^l \frac{E_{ij} \bar{y}_j^2}{N}}}, \quad (7.6)$$

$$\bar{x} = 8,3A,$$

$$\bar{y} = 11,4A.$$

xi[A]	6,5	7	7,5	8	12,5
yi[A]	7	10,5	11	13	15,5

Po obliczeniach otrzymano:

współczynnik korelacji Pearsona:

$$r_{xy} = r_{yx} = 0,430,$$

kowariancja wynosi:  $C(X,Y) = 2,615$ .

Wartość dodatnia kowariancji wskazuje na zależność korelacyjną dodatnią.

Współczynnik determinacji:

$$100r^2 = 18,493. \quad (7.7)$$

Zmiany przerwy między elektrodami wpływają w ok.18% na zmiany amplitudy prądu iskry.

Przedział ufności:

Wyznaczono przedział ufności dla odchylenia standardowego empirycznego[25]:

- cewka klasyczna:  $s = 2,159$ ,

- cewka modyfikowana:  $s_1 = 2,819$ ,

na poziomie ufności  $\alpha = 0,02$ ,

dla liczebności  $n = 10$ ,

wobec tego:

$$P\left(\frac{10}{\sigma^2} S^2 \leq a_1\right) = 0,99,$$

$$P\left(\frac{10}{\sigma^2} S^2 \geq a_2\right) = 0,01,$$

stąd otrzymano:  $a_1 = 2,088,$   
 $a_2 = 21,666.$

**Przedział ufności wynosi :**

rozkład  $\chi^2$ :

-cewka typowa:  $(4,72; 1,47),$

- cewka modyfikowana:  $(6,17; 1,91),$

rozkład Studenta:

- poziom ufności  $\alpha = 0,01$  stąd  $t_\alpha = 3,250,$

wobec tego, przedział ufności:

$$\left(\bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_\alpha; \bar{x} \pm \frac{S}{\sqrt{n}} t_\alpha\right), \quad (7.8)$$

dla cewki typowej:  $(5,96A; 10,64A),$

dla cewki modyfikowanej:  $(9,06A; 13,74A).$

Z otrzymanych wyników widać, iż przedział liczbowy o krańcach 5,9614 i 10,6386 amperów jest jednym ze wszystkich możliwych do otrzymania przedziałów, który z prawdopodobieństwem 99% pokrywa nieznaną średnią wartość amplitudy prądu iskry dla cewki klasycznej dla  $n = 3000$  [ obr/min] i przerwy 0,8mm.

Przedział zaś 9,0614 i 13,7386 A jest jednym ze wszystkich możliwych przedziałów, który pokrywa z prawdopodobieństwem 99% nieznaną wartość średnią amplitudy prądu iskry dla cewki modyfikowanej o przerwie 1,1mm. Rozkład Studenta w bardzo wysokim stopniu odwzorowuje wartości uzyskane z pomiarów. Wartości uzyskane w rozkładzie  $\chi^2$  odnoszą się do odchylenia standardowego. Wartości empiryczne odchylenia standardowego  $S$  i  $S_1$  zawierają się wewnątrz przedziału ufności.

## 8. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA CEWKI O ZMIENNEJ INDUKCYJNOŚCI W UKŁADACH STEROWANYCH ELEKTRONICZNIE

### 8.1. Porównanie działania cewki zapłonowej o zmiennej indukcyjności z cewką stosowaną w elektronicznym układzie zapłonowym

W badaniu tym celem było wykazanie uniwersalności prototypowej cewki zapłonowej /Rys.2.19/ i sprawdzenie jej działania w nowoczesnym elektronicznym układzie zapłonowym. Badania przeprowadzono na samochodzie Opel Astra Clasic z silnikiem benzynowym z użyciem diagnosty marki Bosch – FSA 560. Przeprowadzono porównanie przebiegów napięcia pierwotnego i wtórnego układu zapłonowego występującego w wyposażeniu fabrycznym oraz w/w napięć dla układu zmodyfikowanego dla porównywalnych prędkości obrotowych. Modyfikacja układu zapłonowego polegała na zastąpieniu cewki fabrycznej cewką z odczepami – rys. 8.2. Cewki modyfikowanej nie wyposażono w tranzystor sterujący. Dokonano także porównania przebiegów prądów  $i_1$  w obwodzie pierwotnym dla porównywalnych prędkości obrotowych obu układów zapłonowych.



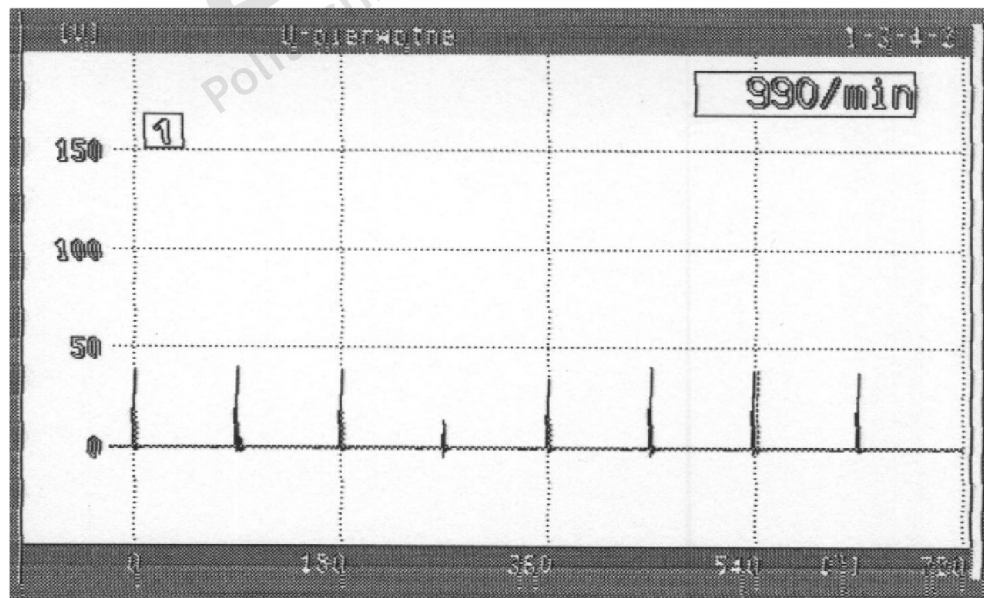
Rys.8.1. Pomiary prądów i napięć w układach elektronicznych z użyciem samochodu testowego Astra Clasic



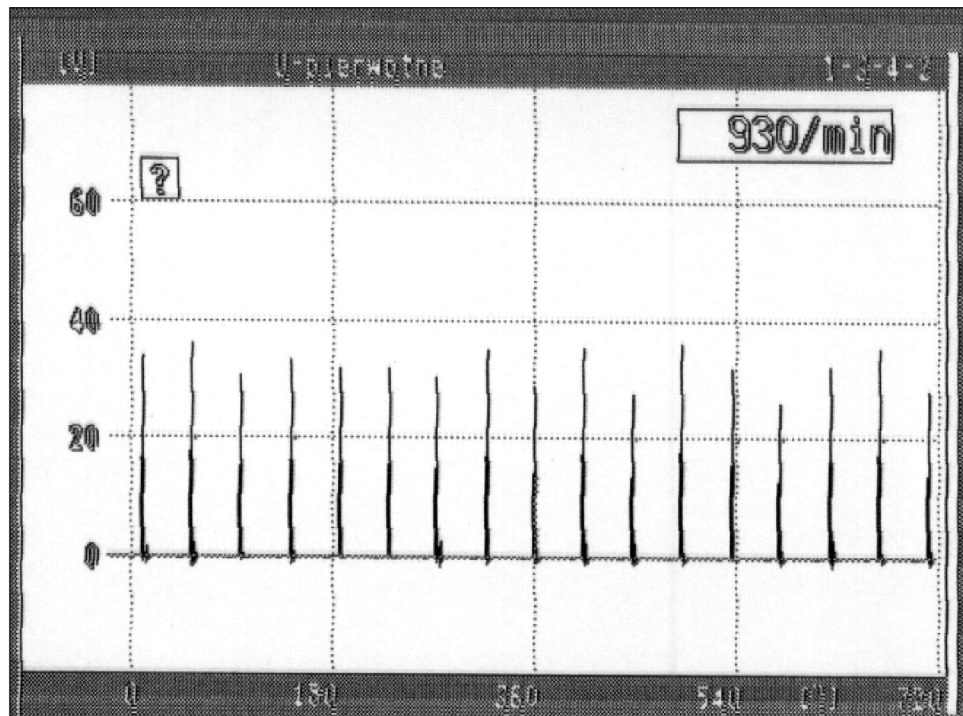
Rys.8.2. Cewka zapłonowa z regulowaną indukcyjnością w samochodzie Astra Clasic

### Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego

Napięcie pierwotne:



Rys.8.3. Napięcie pierwotne obwodu z cewką zapłonową modyfikowaną

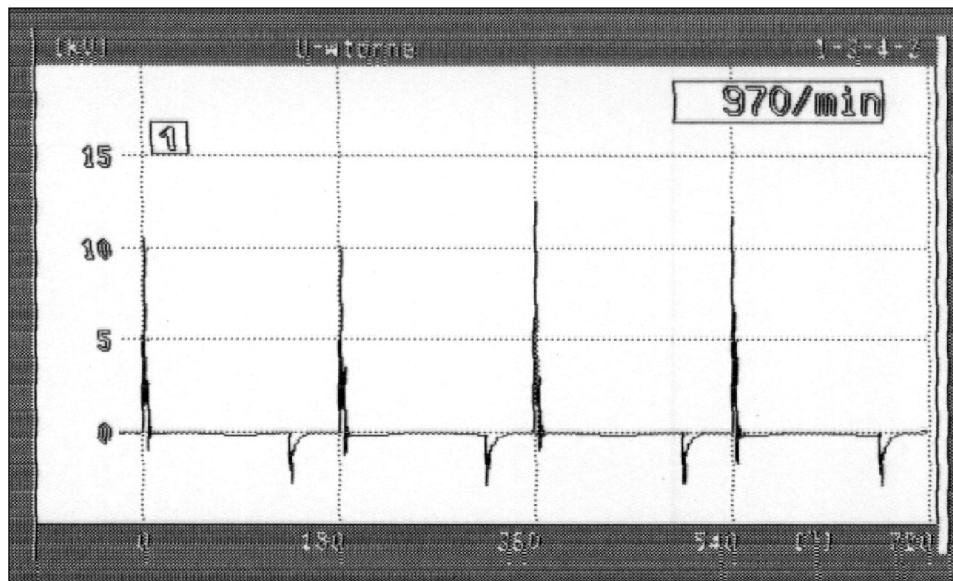


Rys.8.4. Napięcie pierwotne obwodu z zapłonem elektronicznym fabrycznym

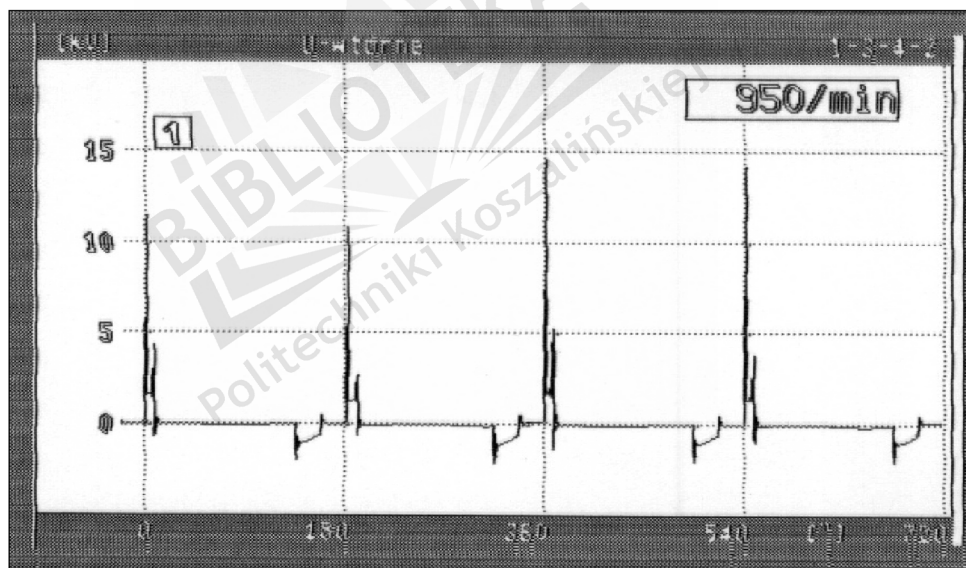
Na powyższych oscylogramach wartości napięć pierwotnych osiągają podobne wartości tj. około 40V. Różnica gęstości impulsów napięcia pierwotnego wynika z elektronicznego sterowania cewką fabryczną samochodu Opel Astra. Nie wpływa to jednak na pracę całego układu, gdyż elektroniczne sterowanie wytwarza więcej impulsów pierwotnych niż jest to konieczne do zapłonu mieszanki. Widać to na przebiegach napięć wtórnych powodujących zapłon mieszanki, na których liczba impulsów w obu przypadkach jest taka sama - rys.8.5 i 8.6. Wartości napięć wtórnych osiągają zbliżone wartości około 12kV w obu układach. Praca silnika przebiegała bez zakłóceń. Kształt napięcia w układzie modyfikowanym wskazuje na nieco krótszą linię iskry. Różnica napięć wskazuje na niższe ciśnienie sprężania w trzecim cylindrze i świadczy o stopniu zużycia cylindra.



## Napięcie wtórne



Rys.8.5. Napięcie wtórne obwodu zapłonowego z cewką modyfikowaną



Rys.8.6. Napięcie wtórne obwodu elektronicznego

Obwód zapłonowy modyfikowany:

Napięciem spalania / linia iskry/ nazywamy napięcie po zainicjowaniu przeskoju iskry do jej końca. Odpowiednio do czasu napięcia spalania przyjmuje się czas spalania:

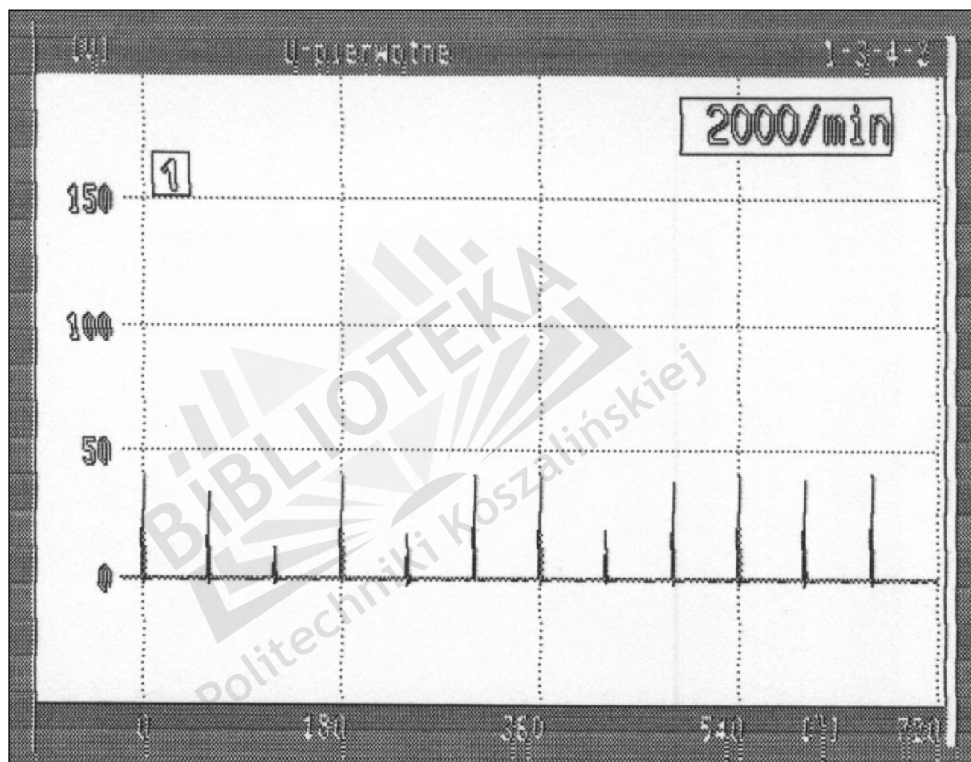
- napięcie spalania dla poszczególnych cylindrów : 1-3-4-2 wynoszą odpowiednio: 1,5kV; 1,4kV; 1,5kV; 1,6 kV,
- czas spalania : 0,88 ms; 0,91 ms; 0,88 ms; 0,83 ms.

Obwód zapłonu elektroniczny – fabryczny:

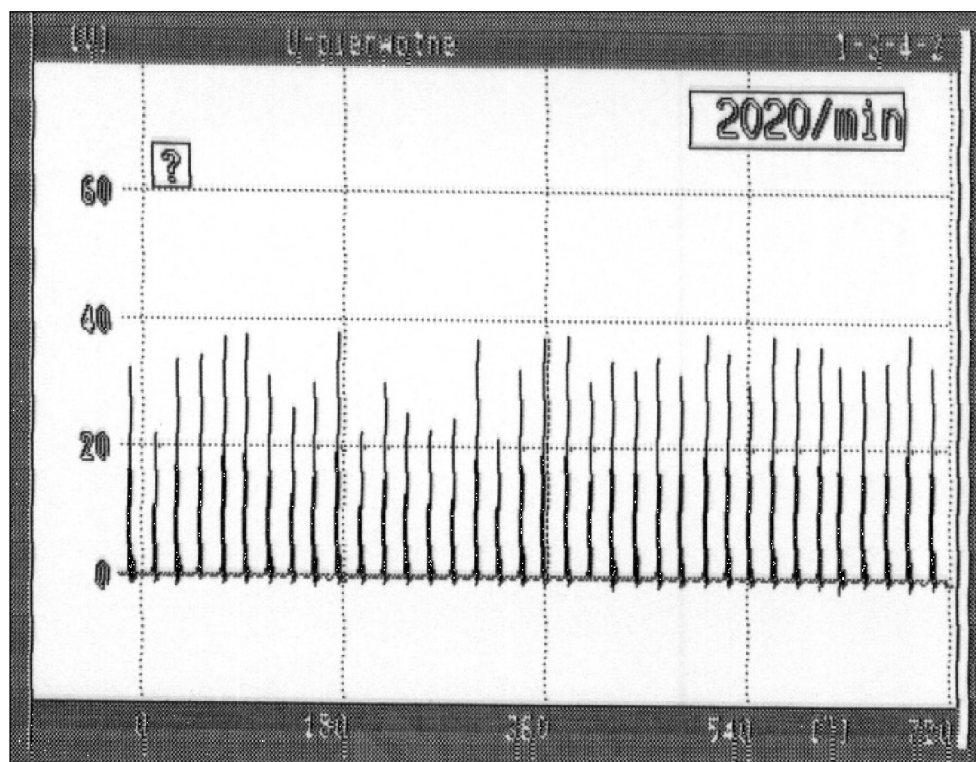
- napięcie spalania: 1,6 kV ; 1,6 kV ; 1,6 kV ; 1,6 kV,
- czas spalania: 1,61 ms ; 1,61 ms ; 1,58 ms ; 1,56 ms.

**Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego dla  $n \sim 2000$  obr/min.**

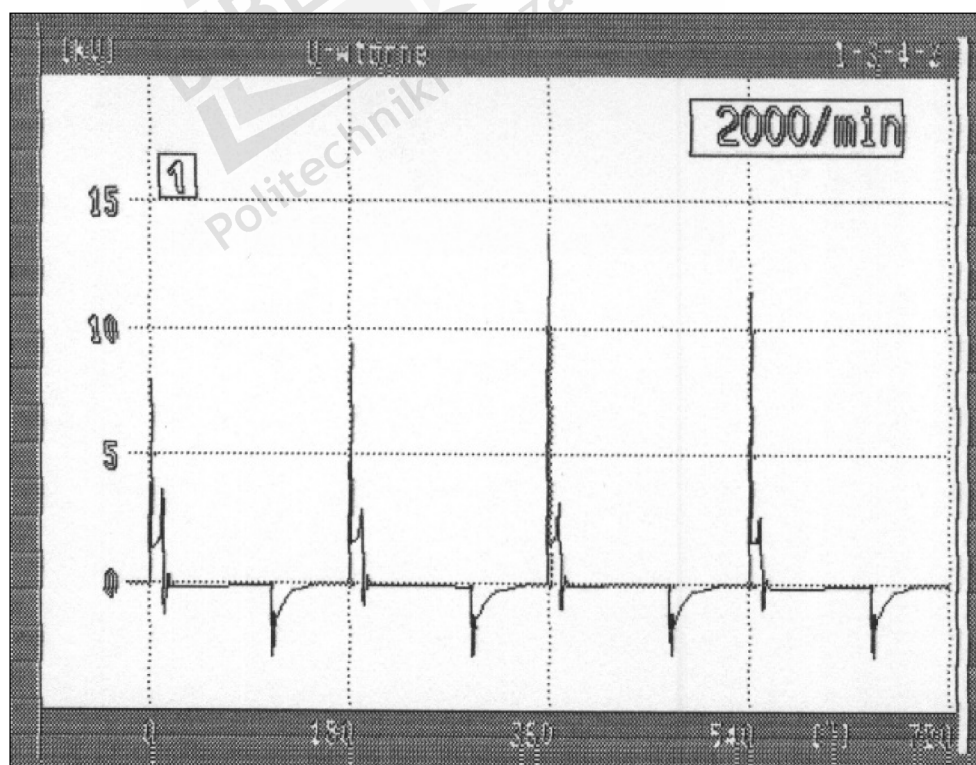
**Napięcie pierwotne:**



Rys.8.7. Napięcie pierwotne obwodu zapłonowego z cewką zapłonową modyfikowaną



Rys.8.8. Napięcie pierwotne obwodu z zapłonem elektronicznym  
**Napięcie wtórne**



Rys.8.9. Napięcie wtórne obwodu zapłonu z cewką modyfikowaną



Rys.8.10. Napięcie wtórne zapłonu elektronicznego

Przebiegi napięć pierwotnych i wtórnych są porównywalne co do kształtu i wartości. W zapłonie modyfikowanym nieco krótsza linia iskry.

Obwód zapłonowy modyfikowany:

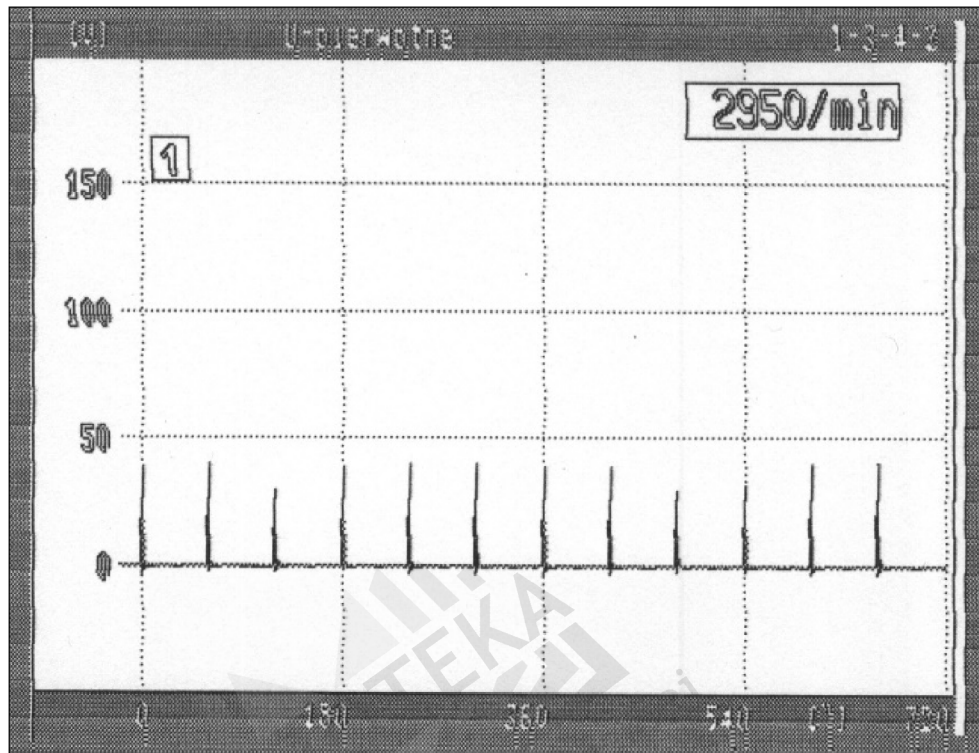
- napięcie spalania : 1,4kV ; 1,3kV ; 1,5 kV ; 1,5kV.
- czas spalania ładunku: 0,86 ms; 0,89 ms; 0,82 ms; 0,85 ms.

Obwód zapłonu elektroniczny – fabryczny:

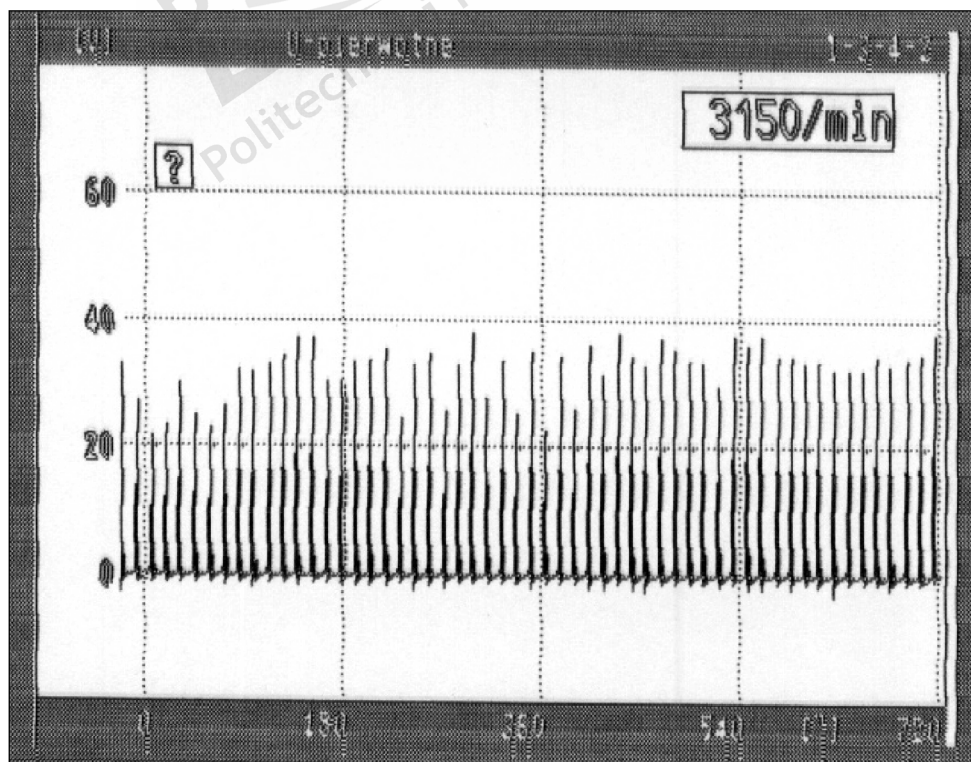
- napięcie spalania : 1,6kV ; 1,6kV ; 1,6kV ; 1,6kV.
- czas spalania ładunku: 1ms ; 1ms ; 0,85ms ; 0,9 ms.

**Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego dla  $n \sim 3000$  obr/min.**

**Napięcie pierwotne**



Rys.8.11. Napięcie pierwotne obwodu z cewką modyfikowaną



Rys.8.12. Napięcie pierwotne obwodu elektronicznego

## Napięcie wtórne



Rys.8.13. Napięcie wtórne obwodu z cewką modyfikowaną



Rys.8.14. Napięcie wtórne zapłonu elektronicznego

Przebiegi napięć wskazują na nieco wyższe napięcia wtórne zapłonu elektronicznego. Wynika to z elektronicznego sterowania cewki fabrycznej i lepszych parametrów cewki fabrycznej.

Obwód zapłonowy modyfikowany:

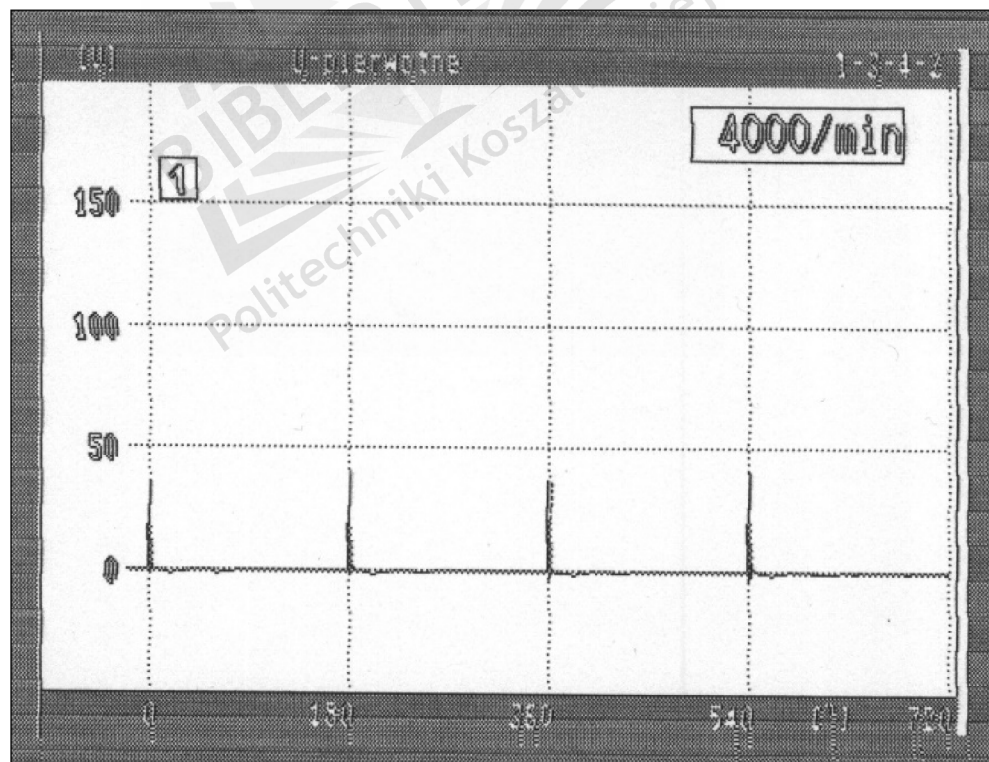
- napięcie spalania: 1,6 kV ; 1,6 kV; 1,7 kV; 1,7 kV,
- czas spalania : 0,81 ms ; 0,80 ms ; 0,77 ms ; 0,78 ms.

Obwód zapłonu elektroniczny – fabryczny:

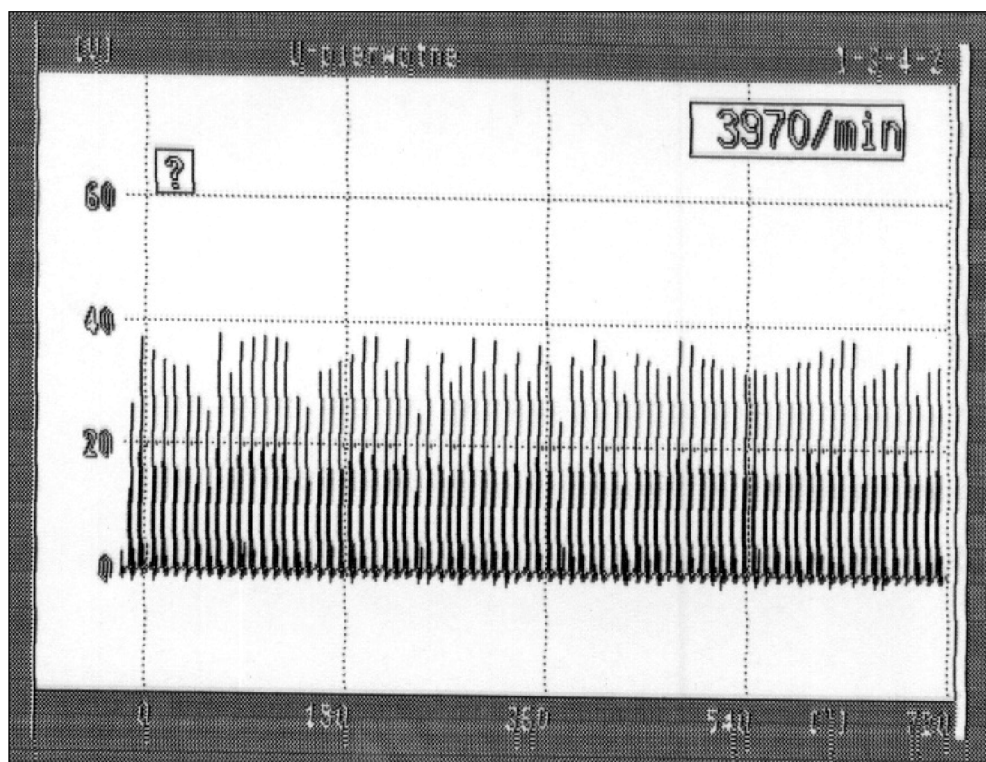
- napięcie spalania :1,4kV; 1,4kV; 1,4kV; 1,3kV,
- czas spalania :1,1ms; 1ms; 1,1ms; 0,9ms.

**Przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego dla  $n \sim 4000$  obr/min.**

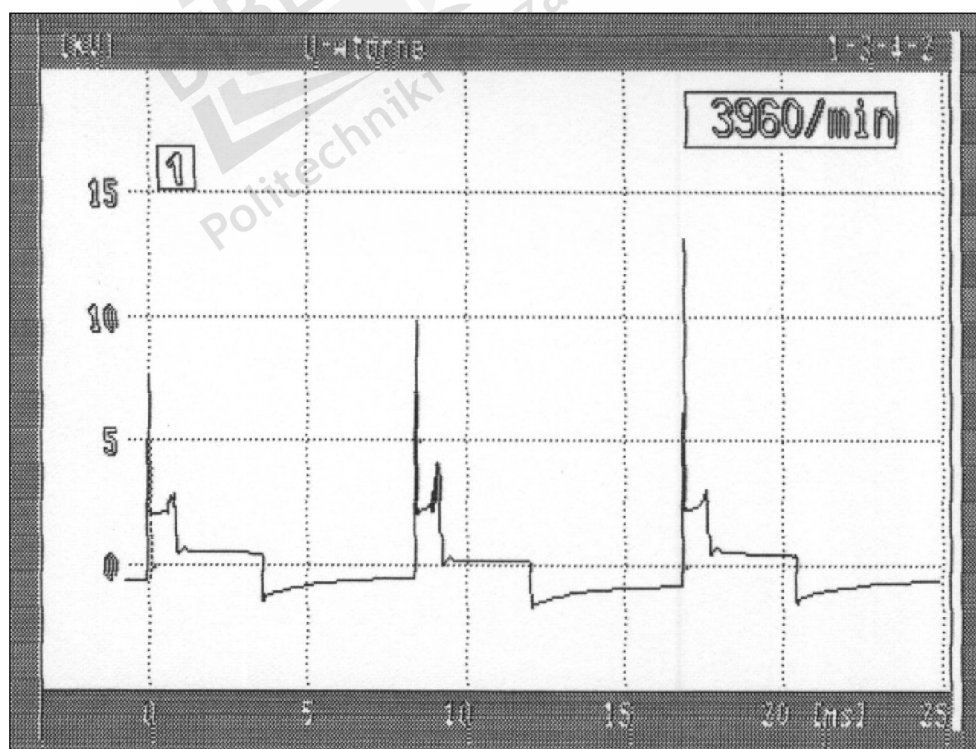
**Napięcie pierwotne**



Rys.8.15. Napięcie pierwotne z cewką modyfikowaną

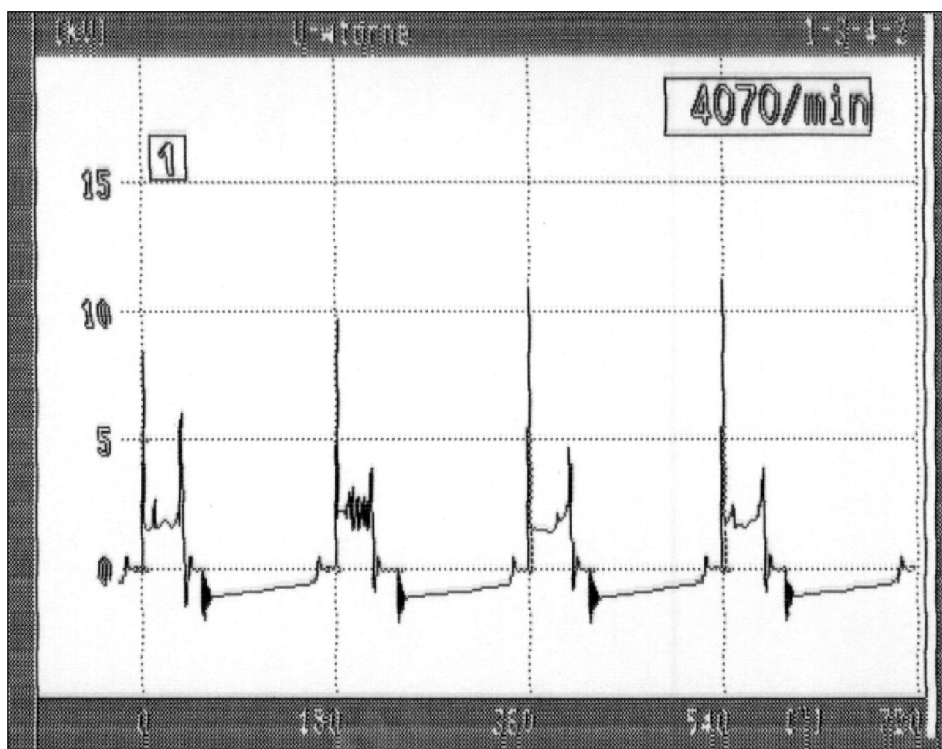


Rys.8. 16. Napięcie pierwotne zapłonu elektronicznego  
Napięcie wtórne



Rys.8.17. Napięcie wtórne z cewką modyfikowaną





Rys.8.18. Napięcie wtórne zapłonu elektronicznego

Obwód zapłonowy modyfikowany:

- napięcie spalania: 2kV; 2kV; 2kV; 2kV,
- czas spalania ładunku: 0,9ms; 0,8ms; 0,8ms; 0,8ms.

Obwód zapłonu elektroniczny – fabryczny:

- napięcie spalania :2kV; 2kV; 1,8kV; 2kV,
- czas spalania ładunku: 1,2ms; 1,1ms ; 1,3ms ; 1,3ms.

### Zestawienie wyników pomiarów przedstawionych w punkcie 8.1.

**Tabela 8.1**

Ip.	n[obr/ min.]	Cewka fabryczna				Cewka modyfikowana			
		Napięcie pierwotne Up [V]	Napięcie wtórne Us[kV]	Napięcie spalania [kV]	Czas spalania [ms]	Napięcie pierwotne [V]	Napięcie wtórne [kV]	Napięcie spalania [kV]	Czas spalania [ms]
1	950	40	12	1,6; 1,6; 1,6; 1,6	0,88;0,91; 0,88;0,83	40	12	1,5;1,4; 1,5;1,6	0,88;0,9; 0,88;0,83
2	2000	40	10	1,6;1,6; 1,6;1,6	1;1;1;1	40	10	1,4;1,3; 1,5;1,5	0,86;0,89 0,82;0,85
3	3000	40	10	1;1;1;1;1	1;1;1; 1,1;0,9	40	9	1,6;1,6; 1,7;1,7	0,81;0,80 0,77;0,78
4	4000	40	10	2;2;2;2	1,2;1,1; 1,3;1,3	40	10	2;2;2;2	0,9;0,8; 0,8;0,8

Napięcia pierwotne:

Dla wszystkich prędkości obrotowych wartości napięć są porównywalne i wynoszą ok. 40V.

Napięcia wtórne:

W pełnym zakresie napięć napięcia maksymalne są porównywalne i wynoszą od 8 do 15kV dla obu systemów zapłonowych . W zależności od stopnia zużycia są zróżnicowane na poszczególnych cylindrach, ale widać, iż zmiana cewki zapłonowej nie wpłynęła na pogorszenie przebiegu napięcia wtórnego w zakresie kształtu i wartości.

W zakresie parametrów spalania również otrzymano wartości porównywalne.

Jak widać w zapłonie sterowanym elektronicznie czas spalania ładunku w komorze spalania jest ok. dwukrotnie dłuższy. Wynika to z elektronicznego sterowania i nieco gorszych parametrów cewki zapłonowej modyfikowanej użytej do badań tj. rezystancja uzwojenia pierwotnego w cewce oryginalnej wynosi ok. 0,9  $\Omega$  a cewce prototypowej ok. 1,2  $\Omega$ . Poza tym wartość maksymalna prądu pierwotnego w układzie modyfikowanym jest osiągnięta szybciej niż w układzie sterowanym elektronicznie za względu na wykładniczy wzrost prądu pierwotnego, co niewątpliwie wpływa na czas przebiegu impulsu napięcia wtórnego. Indukcyjność obwodu pierwotnego cewki elektronicznej wynosi ok.3mH a cewki modyfikowanej ok.4,5 mH.

## **8.2. Przebiegi prądów w obwodzie pierwotnym**

Prędkość narastania prądu w uzwojeniu pierwotnym wpływa na jego wartość końcową. Jest to o tyle istotne , iż w wypadku wzrostu prędkości obrotowej silnika maleje czas fazy wzrostu prądu w obwodzie pierwotnym, co prowadzi do zdrobnienia impulsów prądowych. Wpływa to na zmniejszenie napięcia wtórnego i w rezultacie może doprowadzić do wypadania zapłonów. Tabela 8.2 przedstawia amplitudy prądów w obwodzie pierwotnym zapłonu elektronicznego samochodu Astra Clasic oraz zapłonu modyfikowanego z cewką o regulowanej indukcyjności w w/w samochodzie dla różnych prędkości obrotowych. Przykładowe przebiegi prądów dla cewki fabrycznej i modyfikowanej przedstawiono w załączniku do tabeli 8.2.

## Porównanie prądów w różnych rodzajach zapłonów

Tabela 8.2

Obroty [obr/min.]	Prąd w obwodzie pierwotnym [A]	
	Zapłon modyfikowany	Zapłon elektroniczny fabryczny
950±50	5,9	6,0
~ 2000	5,9	6,0
~ 3000	5,9	6,0
~ 4000	5,9	6,0
~ 5500	5,7	6,0

Prędkość narastania prądu w obwodzie pierwotnym zależna jest od stałej czasowej uzwojenia pierwotnego tj.: ze wzoru :

$$i_1 = \frac{U}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

wynika, że prędkość narostu prądu wynosi:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U}{L} e^{-Rt/L}$$

dla  $t_z = 0$  w pierwszej chwili zwarcia:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U}{L}$$

Można zapisać dla  $U = \text{const.}$ , że :

$$\frac{di_1}{dt} = f(L)$$

Z uwagi na ograniczoną obciążalność prądową przerywacza zapłonu, która wynosi ok. 3,6 do 5 A, można określić rezystancję uzwojenia pierwotnego.

Przy wzroście prędkości obrotowych lub liczby cylindrów należy zmniejszyć indukcyjność uzwojenia pierwotnego.

Z przebiegów prądu wynika:

zapłon elektroniczny:

dla  $n = 960$  obr/min.

$$di_1/dt = 2000 = \tan \alpha = 6/24,4 \text{ ms} = 6000/24,4 \text{ A/s} = 245,9 \text{ A/s},$$

- czas trwania impulsu: 24,4 ms,

dla  $n = 2090$  obr/min.

$$di_1/dt = 6A/9,88\text{ms} = 6000/9,88\text{A/s} = 607,28 \text{ A/s},$$

- czas trwania impulsu: 9,88ms,

dla  $n = 2990$  obr/min.

$$di_1/dt = 6 \text{ A}/6,75\text{ms} = 888,88\text{A/s},$$

- czas impulsu: 6,75 ms,

dla  $n = 4120$  obr/min.

$$di_1/dt = 1431,98\text{A/s},$$

- czas impulsu: 4,19 ms.

W układzie sterowanym elektronicznie prąd narasta według równania :

$$i_k = f(n),$$

gdzie;  $i_k$  – wartość końcowa prądu pierwotnego dla danej  $n$ .

We wszystkich przebiegach wartość końcowa prądu pierwotnego osiąga 6A. Jest to rezultatem elektronicznych układów kształtujących przebieg prądu w obwodzie pierwotnym.

Przebieg prądu w fazie narastania ma charakter liniowy. Prędkość narastania maleje:

$$di_1/dt = f(n),$$

Zmniejszenie prędkości narastania wynika ze wzrostu prędkości obrotowej, maleje wówczas czas impulsu zapłonowego w czujniku Halla będącym odpowiednikiem przerywacza zapłonu, służącym do synchronizacji pracy silnika z urządzeniem sterującym zapłonem.

Zapłon modyfikowany.

dla  $n = 990$  obr/min.

$$di_1/dt = 253,2\text{A/s},$$

- czas impulsu: 23,3 ms,

dla  $n = 2130$  obr/min.

$di_1/dt = 649,77A/s$ ,

- czas impulsu: 9,08 ms,

- dla  $n = 3050$  obr/min.

$di_1/dt = 1036,90A/s$ ,

- czas impulsu: 5,69 ms,

dla  $n = 4420$  obr/min.

$di_1/dt = 2027,49A/s$ ,

- czas impulsu: 2,91 ms,

dla  $n = 5580$  obr/min.

$di_1/dt = 2500 A/s$ ,

- czas impulsu: 2,36 ms.

Prędkości narastania prądów w obwodzie pierwotnym układu zapłonowego modyfikowanego są zdecydowanie większe. Widać to na oscylogramach przebiegów prądów. Jest to rezultatem wykładniczego charakteru narastania prądu /załącznik nr 6/.

Odpowiednikiem czasu zwarcia styków przerywacza zapłonu  $t_z$  jest czas działania strumienia magnetycznego na czujnik Halla w nadajniku impulsów zapłonowych w aparacie zapłonowym.

Charakter przebiegu prądu to jest, krótszy czas trwania impulsu wpływa na czas trwania iskry. Widać to na oscylogramach napięcia wtórnego. Widać regułę : około dwukrotnie krótszy czas trwania impulsu powoduje ok. dwukrotne skrócenie czasu trwania iskry w układzie zapłonowym modyfikowanym. Nie wpływa to jednak w sposób istotny na parametry pracy samochodu.

Wartości końcowe prądu w uzwojeniu pierwotnym układu modyfikowanego wynoszą 5,9A

### **Podsumowanie rozdziału**

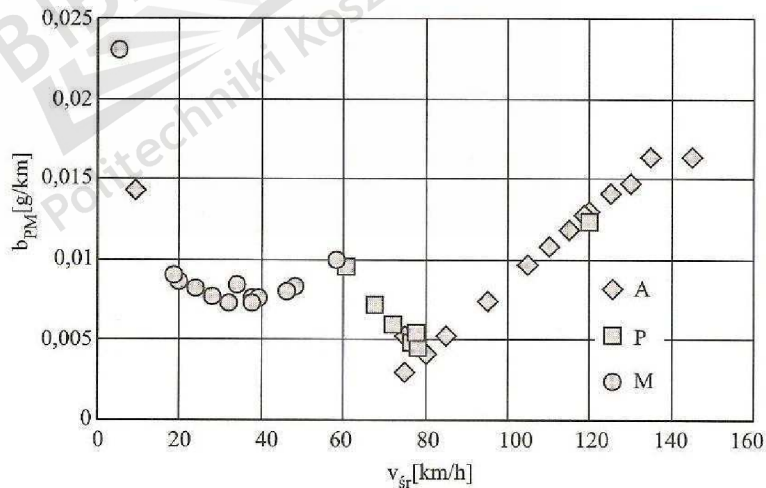
W wyniku analizy powyższych przebiegów można stwierdzić, że zastosowanie uniwersalnej cewki zapłonowej w elektronicznych układach zapłonowych nie pogarsza parametrów pracy samochodu. Stwarza to perspektywy stosowania w różnych układach zapłonowych uniwersalnych cewek wysokiego napięcia - tj. unifikację i potaniecie produkcji oraz obniżkę cen finalnych produktu, przy niezmiennych parametrach pracy samochodu.

## 9. WPŁYW UKŁADU ZAPŁONOWEGO NA CHARAKTERYSTYKĘ SILNIKA

### 9.1. Wprowadzenie

Biorąc pod uwagę fakt, że badania silnika zdecydowano prowadzić w samochodzie przeznaczonym do ruchu miejskiego, postanowiono ograniczyć ich zakres do mocy częściowych. Zakres badań określono analizując najczęściej wykorzystywane moc i moment obrotowy w ruchu miejskim. Taki sposób postępowania pozwalał ograniczyć ich zakres oraz pracochłonność. Było to rozwiązanie logiczne biorąc pod uwagę przede wszystkim czasochłonność prób hamownianych, które miały tą zaletę, że zapewniały dużą powtarzalność rezultatów niezależną od warunków atmosferycznych i pogodowych, co jak można przypuszczać trudno będzie uzyskać w warunkach badań drogowych, przewidzianych jako następny etap prac prowadzonych.

Ten stan rzeczy skłonił autora do zbadania możliwości zastosowania zmian w układzie zapłonowym silników samochodów osobowych, które poruszają się po mieście przy niepełnym obciążeniu, pracując na mocach częściowych. Taką sytuację przedstawiono na rysunku 9.1, z którego wynika, że prędkość jazdy samochodów w ruchu miejskim nie przekracza 60 km/h.



Rys. 9.1 Zależność emisji drogowej cząstek stałych  $b_{PM}$  od średniej prędkości jazdy  $V_{sr}$  dla różnych modeli ruchu (A – na autostradzie, P – poza miastem, M – w mieście) [70].

Ta prędkość jazdy odpowiada mocy częściowej dla silników napędzających samochody osobowe i ciężarowe wg przeprowadzonych badań [70]. Dopuszczalna prędkość jazdy zgodnie z Ustawą Prawo o Ruchu drogowym wynosi co prawda 50 km/h, ale ze względu na realne rezultaty tego co dzieje się na krajowych drogach przedstawione na rys.9.1, postanowiono skoncentrować się na prędkości 60 km/h, którą uznano za reprezentatywną dla

ruchu drogowego w miastach. Przyjmując tą prędkość za podstawę należało wyznaczyć wartość prędkości obrotowej silnika odpowiadającej tej prędkości. Zakres badań silnika na mocach częściowych wyznaczono na podstawie charakterystyk zewnętrznych badanych silników i był on wyliczony w sposób podany niżej [70] :

$$V = Z \frac{2 \sqrt{r_k n_s}}{60 i_c} , \quad (9.1)$$

gdzie :  $r_k$  – promień koła [mm],  
 $i_c$  – przełożenie całkowite zespołu napędowego,  
 $i_g$  – przełożenie przekładni głównej,  
 $i_b$  – przełożenie skrzyni biegów,  
 $n_s$  – prędkość obrotowa silnika [1/min],  
 $V$  – prędkość jazdy samochodu [km/h],

$$\text{stąd} \quad V = Z n_s \frac{0,38}{\left( \frac{i_c}{r_k} \right)} , \quad (9.2)$$

a zatem

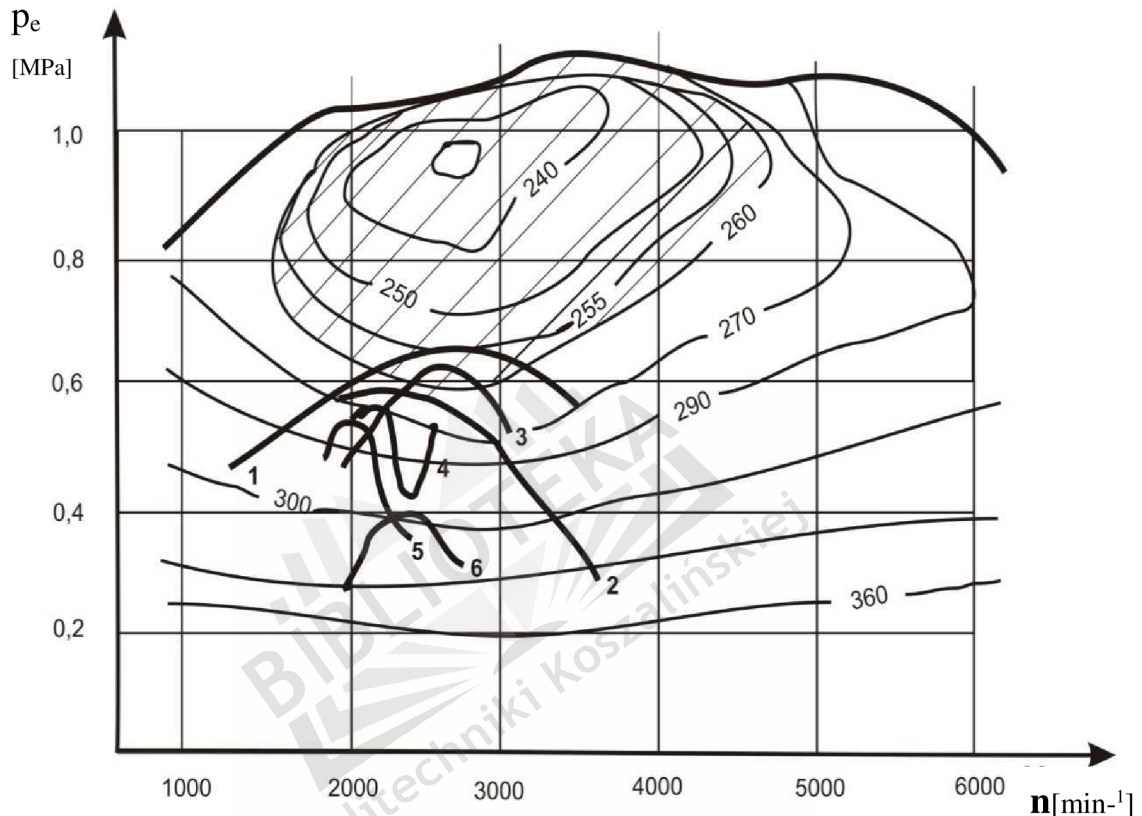
$$n_s = \frac{60}{\left( \frac{i_c}{r_k} \right)} . \quad (9.3)$$

Przełożenie całkowite dla samochodów  $i_c = i_g i_b$ , dla samochodów osobowych przyjmuje się  $i_g \approx 5$  [60]. W przypadku badanego silnika samochodu 1,5 SLE AA przyjęto następujące wartości dla wstępnego określenia jego parametrów podczas badań [70,73] :

$r_k = 362,4$  [mm] ,  $i_c = 5,027$  ,  $i_g = 3,94$  ,  $i_b = 1,276$  , co po podstawieniu do wzoru (9.3) daje dla przełożenia II biegu ( 1,276) wartość prędkości obrotowej silnika  $n_s = 2190$  1/min. Dla przełożenia bezpośredniego skrzyni biegów  $i_b = 1$ , wartość prędkości obrotowej silnika będzie równa  $n_s = 1657$  1/min.

Z badań przeprowadzonych w pracy [34,70] dla 30 silników samochodów osobowych wynika, że obszarem najczęściej używanych prędkości obrotowych jest obszar 2000 do 3000 1/min silnika, bez względu na to na jakim przełożeniu całkowitym odbywał się ruch samochodu. Na rys.9.2 pokazano najbardziej ekonomiczny obszar pracy silnika ze względu na jego energochłonność. Zwraca uwagę fakt największego zagęszczenia linii współpracy silników w okolicy prędkości obrotowej 2000 1/min oraz obszar najbardziej ekonomicznej pracy zawarty między 2000 a 3000 1/min. Mając na uwadze fakt, że silniki napędzające taksówki będą pracowały przy niepełnych obciążeniach ( mocach częściowych ), w rezultacie

przeprowadzonej analizy zdecydowano prowadzić badania dla prędkości obrotowych silnika od 900 do 2000 1/min.



Rys.9.2. Wybrane przebiegi linii współpracy silnika o zapłonie iskrowym na charakterystyce ogólnej w czasie przyspieszania samochodu przy różnych przełożeniach skrzyni biegów krzywe - 1,2,3,4,5,6 ( przełożenia całkowite od 4 do 15 ) [70].

Po analizie warunków ruchu miejskiego zdecydowano się na wykonywanie charakterystyk mocy częściowej dla następujących parametrów :

- moc 23 kW przy 2000 1/min, co odpowiadało około 33 % mocy znamionowej i 30 do 40 %  $n_z$

- moment obrotowy 109 Nm , co odpowiadało 59 % maksymalnego momentu obrotowego przy prędkości obrotowej 2000 1/min. Parametry te ustalono biorąc pod uwagę możliwości badań w ruchu miejskim oraz przełożenia całkowite mechanizmów przeniesienia napędu.

Jako dowód poprawności tego rozumowania może posłużyć rys.9.2 pokazujący jak rozkładają się linie współpracy silnika z mechanizmami przeniesienia napędu przy różnych przełożeniach skrzyni biegów dla silnika o zapłonie iskrowym i podobnych parametrach



roboczych do badanego silnika. Obszar zakreskowany na rysunku dotyczy zakresu najbardziej ekonomicznej pracy silników, przy czym istotny jest fakt, że wszystkie oceniane silniki pracują na charakterystykach mocy częściowych (od 30,4 do 56 %). Z tego powodu wybrano jako zakres badań charakterystyki silników na mocach częściowych równych 40 % mocy znamionowej.

## 9.2. Obiekt badań

Jako obiekt badań wybrano silniki typu 1,5 SLE/AA i 1,6 GLI stosowane do napędu samochodów FSO Polonez Caro 1,5 GLE i Atu 1,6 GLI, o następujących danych technicznych:

Typ silnika 1,5 SLE/AA.

Średnica cylindra 77 mm.

Skok tłoka 79,5 mm.

Pojemność skokowa 1481 cm<sup>3</sup>.

Stopień sprężania 9,2.

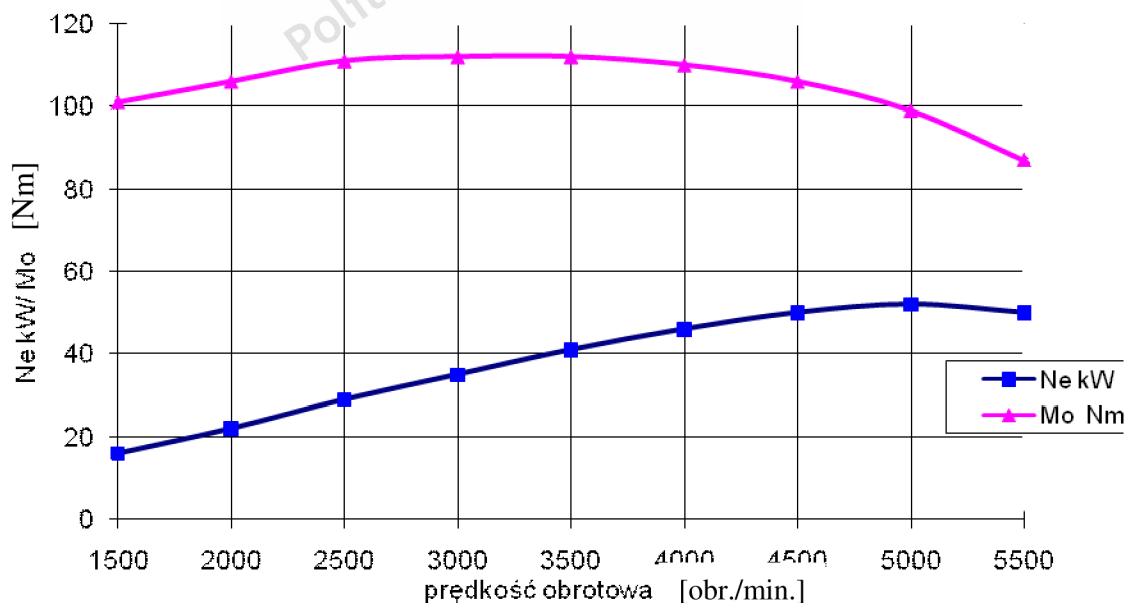
Moc znamionowa 55 kW (75 KM).

Prędkość obrotowa przy mocy znamionowej 5200 1/min.

Maksymalny moment obrotowy 115 Nm.

Prędkość obrotowa dla momentu maksymalnego 3400 1/min.

Układ zasilania gaźnikowy.



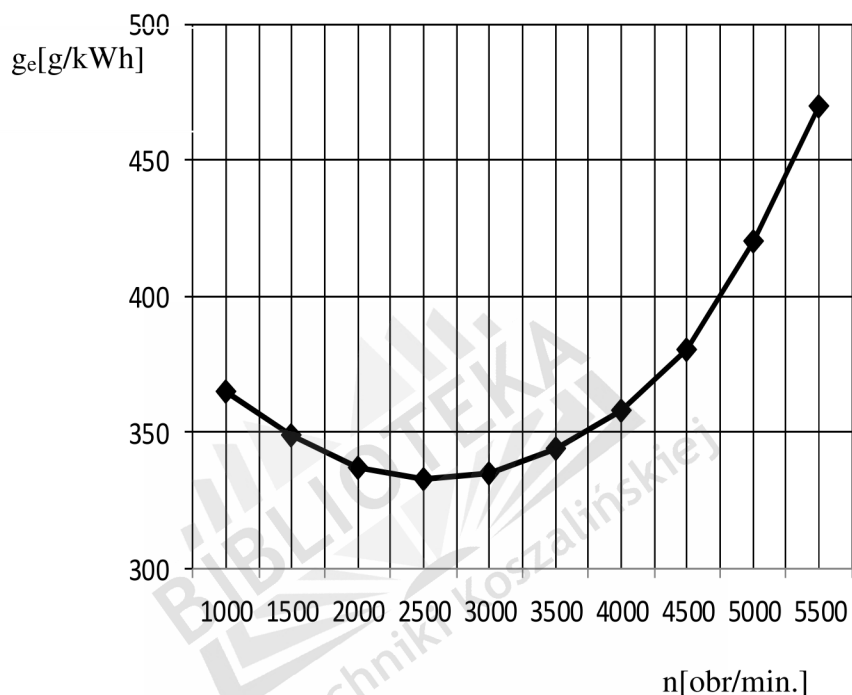
Rys.9.3.Przebieg mocy i momentu obrotowego silnika 1,5 SLE/AA wg danych producenta.

Układ zapłonowy : akumulatorowy, elektroniczny o wyładowaniu indukcyjnym.

Rozdzielacz zapłonu ZEM Zelmot 4497.

Cewka zapłonowa Zelmot 4226.

Świece zapłonowe Iskra FE 65 PS ( Champion N7Y, Bosch W6DC) o odstępie elektrod 0,8 do 1 mm.



Rys.9.4.Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa silnika 1,5 SLE/AA

Kolejnym silnikiem poddanym badaniom był silnik 1,6 GLI, którego dane podano niżej [74]:

Typ silnika 1,6 GLI.

Maksymalny moment obrotowy 125 Nm.

Prędkość obrotowa dla momentu maksymalnego 3200 1/min.

Układ zasilania wtryskowy ( wtrysk jednopunktowy).

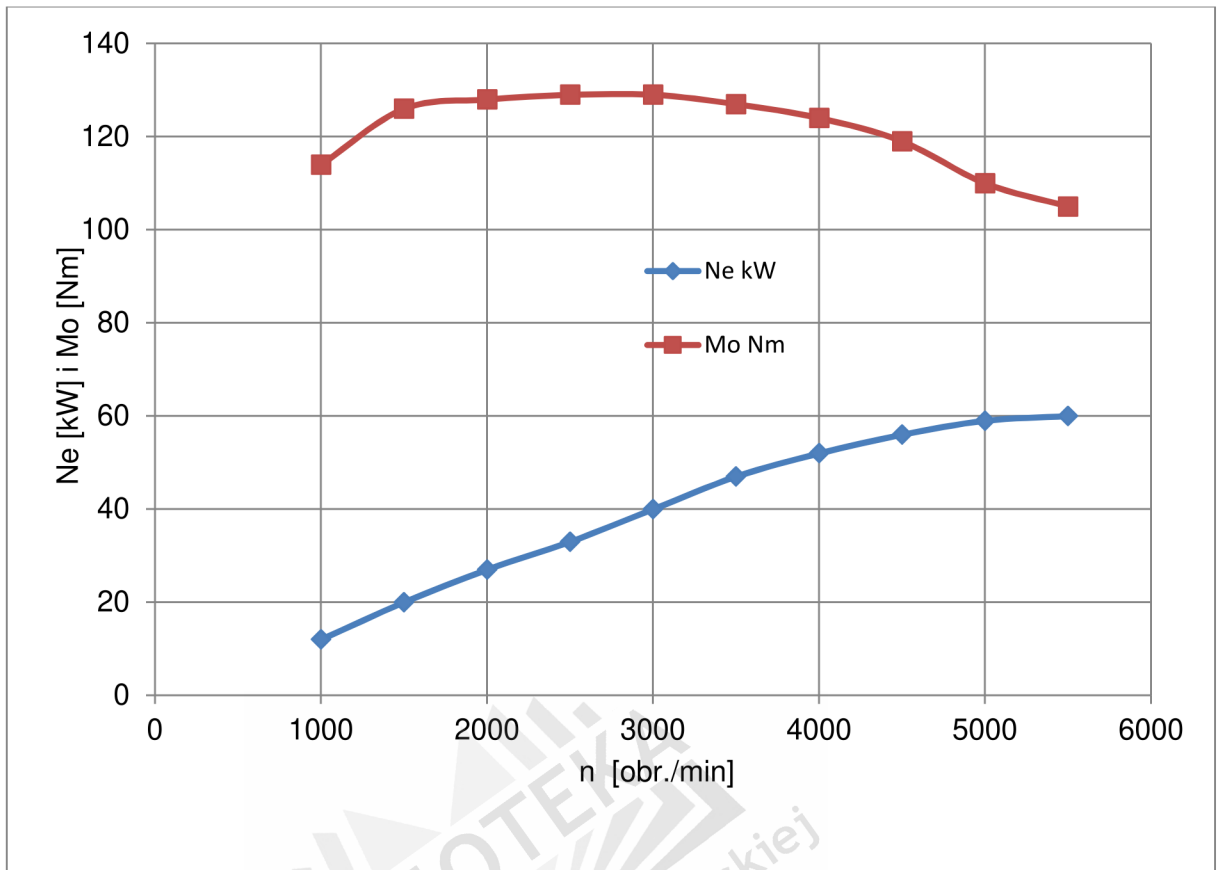
Układ zapłonowy: Multec TBI 700, akumulatorowy, elektroniczny, bezrozdzielaczowy.

Cewki zapłonowe (2) Delco Remy 1103761.

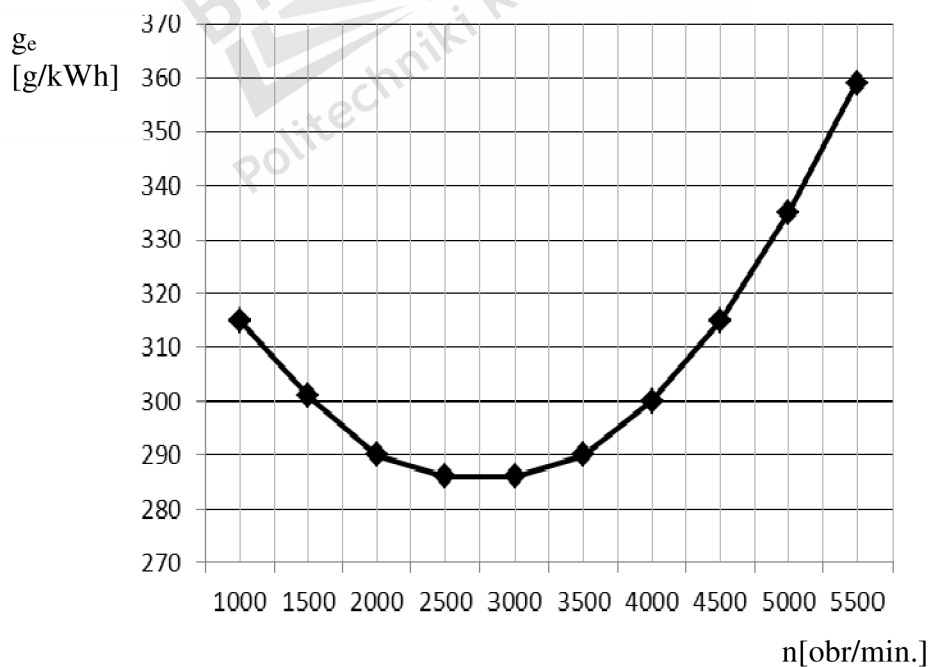
Świece zapłonowe Iskra FE 65 PS ( Champion N7Y, Bosch W6DC)

o odstępie elektrod 0,85 mm.

Charakterystykę przebiegu mocy i momentu obrotowego silnika przedstawiono na rys.9.5 , a jednostkowego zużycia paliwa na rys.9.6.



Rys.9.5.Przebieg mocy i momentu obrotowego silnika 1,6 GLI wg danych producenta

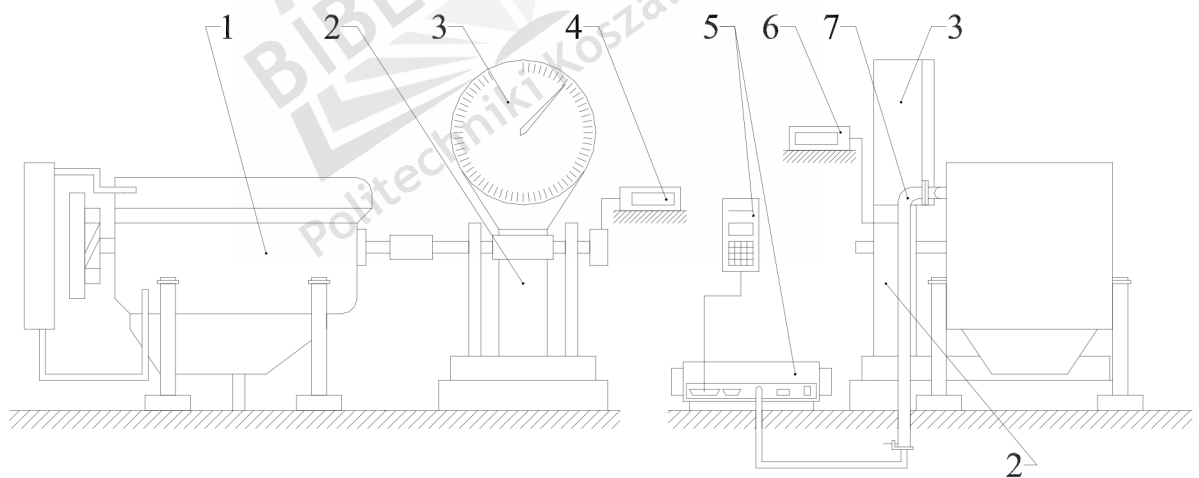


Rys.9.6.Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa silnika 1,6 GLI

### 9.3. Stanowisko badawcze

Badania silnika przeprowadzono na typowym stanowisku dynamometrycznym przedstawionym na rys.9.7. wyposażonym w hamulec hydrauliczny. Hamownia silnikowa pozwala na dokonanie pomiarów podstawowych parametrów roboczych silnika w szerokim zakresie jego prędkości obrotowej i obciążenia. Jest to stanowisko służące do badań stacjonarnych silnika spalinowego wymontowanego z pojazdu. Otrzymane wyniki parametrów roboczych w przeciwieństwie do hamowni podwoziowej nie uwzględniają strat na pokonanie oporów ruchu i bezwładności układu napędowego pojazdu, jak również oporów toczenia kół jezdnych[70,74]. Fakt ten sprawia, iż wyniki uzyskane tą metodą badania silników dają rzeczywisty obraz jakości ich pracy, oraz mogą być podstawą do porównań eliminując wpływ, zróżnicowanych konstrukcyjnie względem siebie, innych układów pojazdów samochodowych.

Podstawowym elementem stanowiska jest hamulec przepływowy typu HSP-75, którego przekrój przedstawiono na rys.9.8, w dwóch rzutach, a charakterystykę roboczą na rys.9.9.



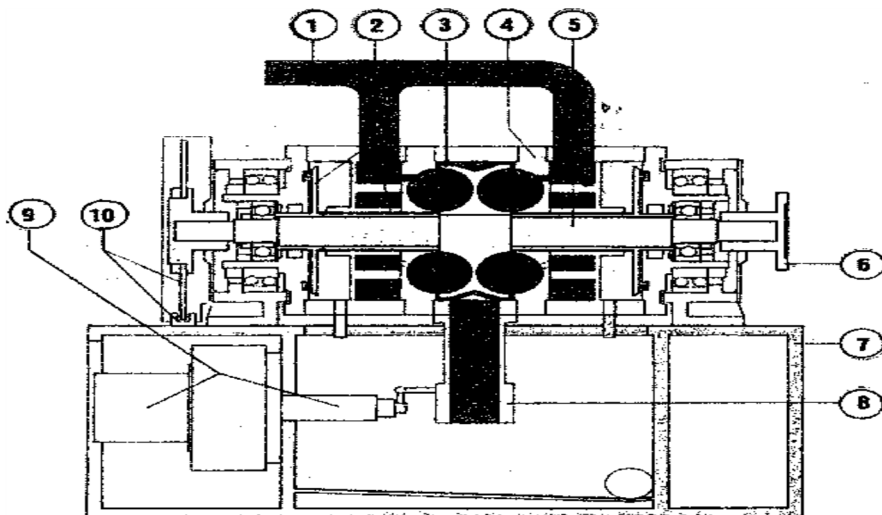
Rys.9.7. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik , 2 – hamulec hydrauliczny HWZ , 3 – dynamometr, 4 – obrotomierz, 5 – sonda pomiaru składu spalin, 6 – miernik temperatury spalin, 7 – układ wydechowy.

Hamulec hydrauliczny zastosowany na stanowisku z rysunku 9.7, umożliwia badanie silników spalinowych o mocy nie przekraczającej 75 kW i prędkości obrotowej 6000 1/min.

Stanowisko badawcze-hamulcowe składa się z następujących elementów :

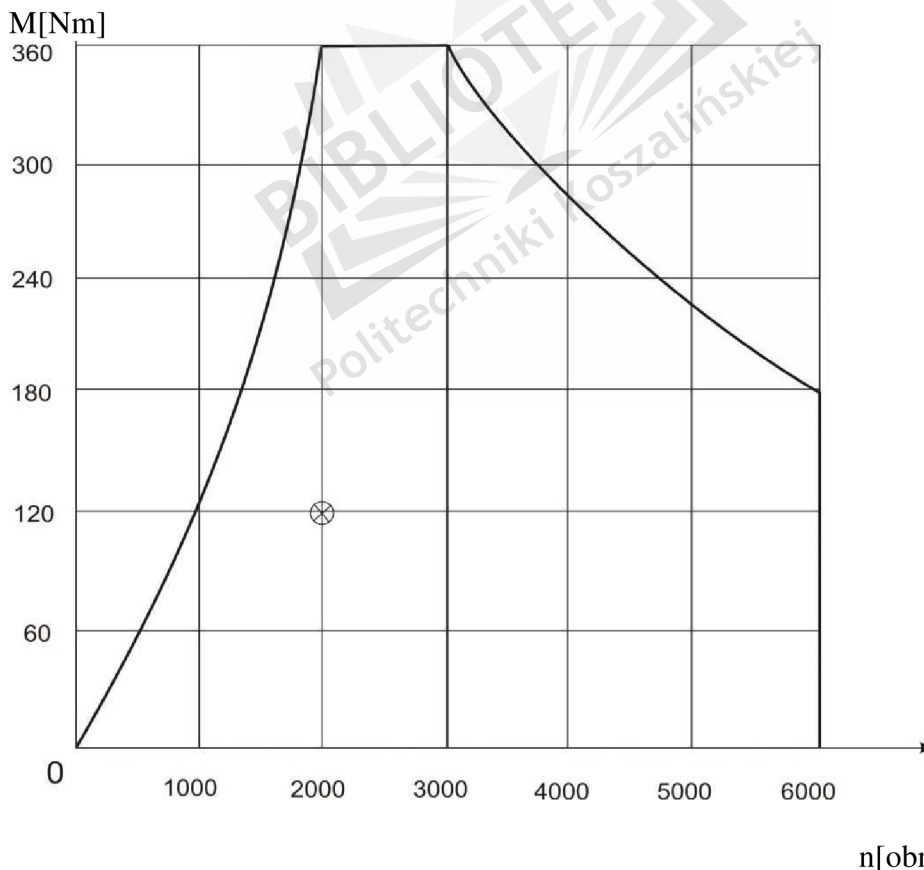
- szafy sterująco –pomiarowej,
- szafy pomiarowej zużycia paliwa,

- hamulca hydraulicznego wraz z podstawą.



Rys.9.8..Hamulec wodny przepływowy

1- Rura doprowadzająca wodę, 2- Uszczelnienie labiryntowe, 3 – Wirnik, 4- Wieniec z łopatkami stały, 5 – Wał, 6 – Tarcza sprzęgła, 7 – Podstawa, 8 – Zawór, 9 – Układ napędowy przepustnicy, 10 – Układ zliczający obroty [75]



Rys.9.9.Charakterystyka robocza hamulca HSP- 75

Urządzenie do pomiaru zużycia paliwa ( metodą wagową) może być zastosowane bez konieczności połączenia go z szafą sterującą.

Stanowisko dynamometryczne przedstawione na rys.9.7 umożliwia następujące pomiary :

- momentu obrotowego silnika,
- prędkości obrotowej silnika,
- ciśnienia wody na wejściu do hamulca,
- ciśnienia oleju w silniku,
- temperatury oleju w silniku,
- temperatury wody chłodzącej silnik,
- temperatury wody wypływającej z hamulca.

Hamulec ten wyposażony jest w silnik elektryczny obustronnego działania umożliwiający zmianę w sposób płynny wartości obciążenia badanego silnika spalinowego, oprócz tego posiada on dynamometr zegarowy umożliwiający odczyt siły obciążającej  $P$  badany silnik w kG. Odczytanie siły z dynamometru hamulca pozwala uzyskać na drodze analitycznej przebieg momentu obrotowego i mocy efektywnej badanego silnika dla szerokiego zakresu jego prędkości obrotowej [74,75].

Punkt zaznaczony na rysunku 9.9 odpowiada maksymalnym parametrom pracy badanego silnika opisanym w rozdziale 9.3. Jest on dostatecznie odległy od linii charakterystyki hamulca ograniczających jego pole pracy, co gwarantuje stabilność parametrów pracy silnika podczas pomiarów. Dokładność pomiarów poszczególnych urządzeń wchodzących w skład stanowiska hamownianego podano w rozdziale Dyskusja błędów pomiaru.

#### 9.4.Sposób przeprowadzania badań

W trakcie wykonywania badań prowadzono pomiary momentu obrotowego silnika, czasu wypływu określonej objętości paliwa z miernicy , toksyczności spalin, współczynnika nadmiaru powietrza oraz temperatury gazów wydechowych. Moc silnika oraz jednostkowe zużycie paliwa wyznaczano na drodze analitycznej posługując się następującymi wzorami :

$$N_e \approx \frac{M_o n}{4080} \quad [\text{kW}] \quad (9.4)$$

gdzie :  $N_e$  – moc efektywna [kW],

$n$  - prędkość obrotowa [1/min]

$$g_e \approx \frac{3600 \pm v}{\geq N_e} \quad [\text{g/kWh}] \quad (9.5)$$

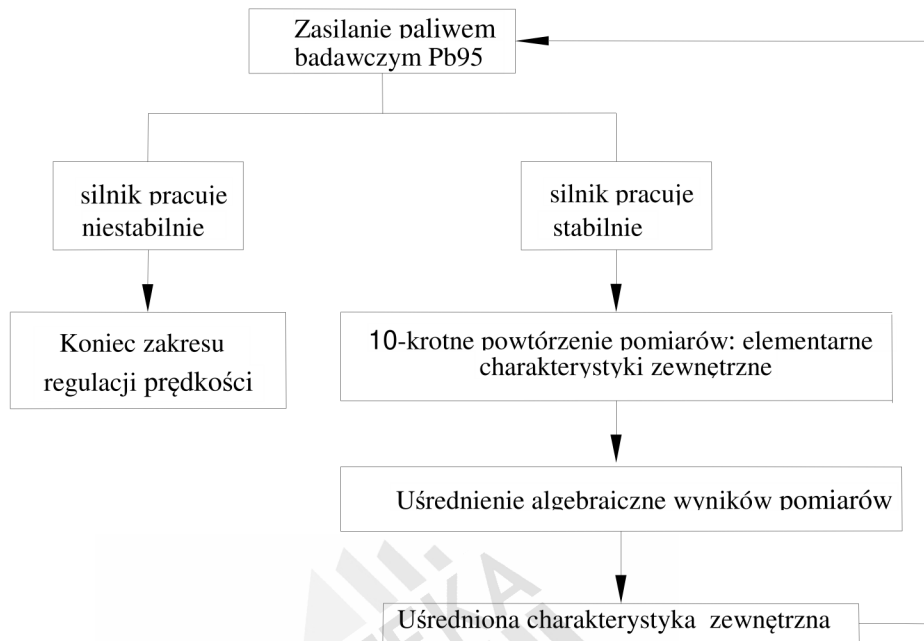
gdzie :  $\rho$  – gęstość paliwa [g/cm<sup>3</sup>],

$v$  – objętość butli pomiarowej [cm<sup>3</sup>],

$\tau$  - czas wypływu paliwa z butli pomiarowej [s],

Dla każdego rodzaju badanego paliwa określano jego gęstość  $\rho$  w trakcie pomiaru.

Badania silnika przeprowadzono na benzynie bezołowiowej Pb95 jako paliwie podstawowym dla silników o zapłonie iskrowym wg schematu przedstawionego niżej:



Rys.9.10. Sposób przeprowadzania badań

Prawidłowe przygotowanie badanych silników do przeprowadzenia badań jest koniecznym składnikiem poprzedzającym pomiary ich parametrów operacyjnych. Przed przystąpieniem do badań sprawdzony został stan techniczny badanego silnika. Zakres tej kontroli obejmował:

- kontrolę organoleptyczną stanu technicznego silnika, i jego osprzętu;
- sprawdzenie prawidłowości rozpylenia strugi paliwa przez wtryskiwacze;
- pomiar ciśnienia sprężania w komorach roboczych silników;
- sprawdzenie ciśnienia oleju silnikowego.

Wyniki kontroli mieściły się w granicach wartości zalecanych przez producenta.

Hamownia silnikowa, na której dokonywano badań, umożliwia, w oparciu o otrzymane wyniki pomiarów, oraz przy zapewnieniu odpowiednich warunków i sposobu przeprowadzenia badań, sporządzenie:

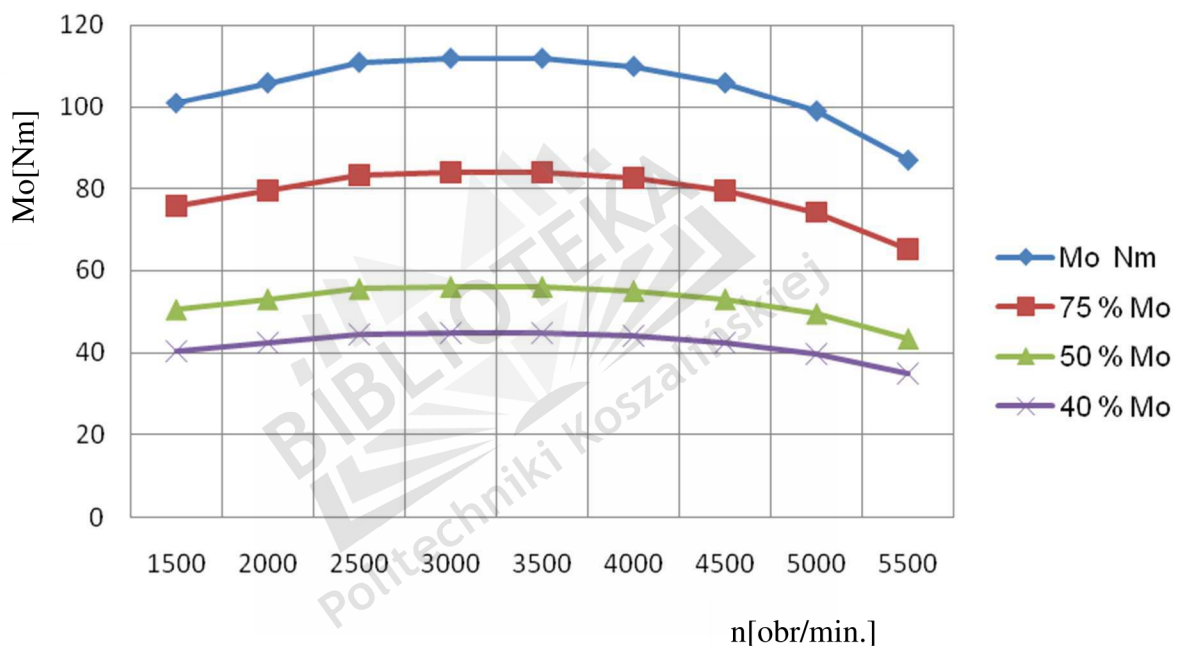
- charakterystyk zewnętrznych silnika (zwane też charakterystykami pełnej mocy);
- charakterystyk mocy częściowych;
- charakterystyk obciążeniowych.

W niniejszej pracy oparto się na sporządzaniu charakterystyk mocy częściowych badanego silnika w zakresie prędkości obrotowych od 1500 do 5000 1/min co 100 1/min. Dawało to od 9 do 15 ( w różnych charakterystykach) punktów pomiarowych przy wymaganych normą 6.

## 9.5. Wyniki pomiarów

### 9.5.1. Pomiary silnika 1,5 SLE/AA

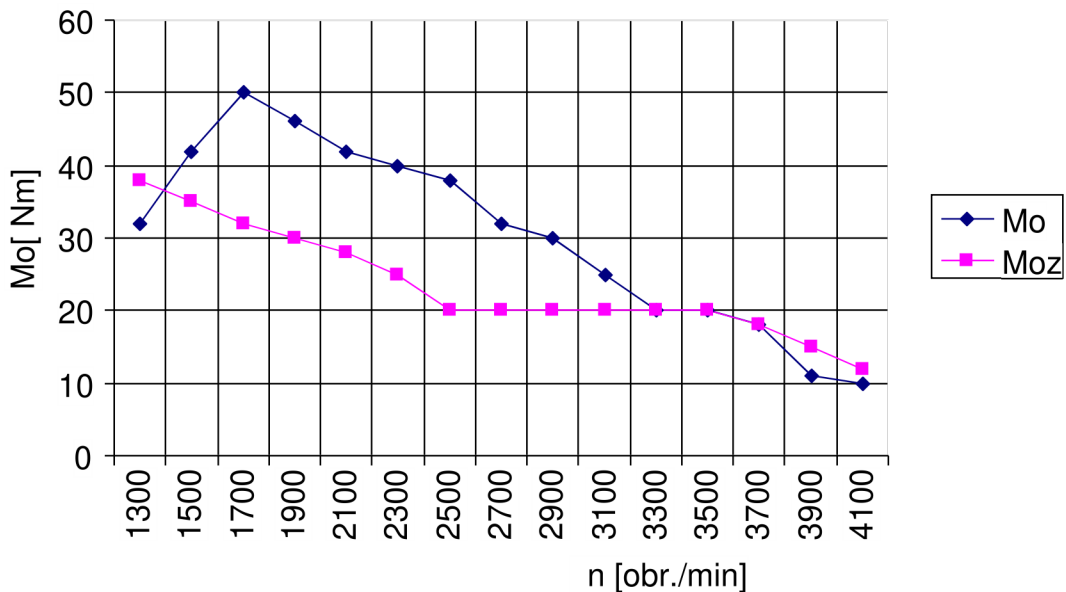
W związku z tym , że zdecydowano się na badanie opisanych wcześniej silników na mocach częściowych, wykonano charakterystykę jego momentu obrotowego dla tych mocy. Do dalszych badań porównawczych przyjęto charakterystykę momentu obrotowego równą 50 % obciążenia.



Rys.9.11. Charakterystyka momentów obrotowych silnika 1,5 SLE/AA

Przebieg krzywej momentu obrotowego przy jego mniejszych wartościach obciążenia jest bardziej płaski, co wpływa na zmniejszenie elastyczności silnika , a tym samym na pogorszenie właściwości trakcyjnych samochodu , który on napędza. Następnie wykonano charakterystykę momentu obrotowego silnika dla standardowego rozdzielacza zapłonu i przy zmienionym odstępnie elektrod z 0,8 mm do 1,0 mm, co przedstawia rysunek 9.12.





Rys.9.12.Charakterystyka przebiegu momentu obrotowego badanego silnika przy różnych wartościach odstępów elektrod świec zapłonowych  
Mo – odstęp elektrod 0,8 mm, Moz – odstęp elektrod 1,0 mm

Przedstawione przebiegi krzywych momentu obrotowego wskazują wyraźnie , że zmiana odstępów z wartości 0,8 mm na 1 mm nie przyniosła pozytywnych efektów, a wręcz odwrotnie. Silnik z fabrycznym ustawieniem odstępów elektrod uzyskał korzystniejsze rezultaty w rejonie prędkości obrotowych 1500 1/min do 3300 1/min. Maksymalną wartość momentu obrotowego badany silnik uzyskał przy prędkości obrotowej 1700 1/min, wynoszącą 50 Nm, tj lepiej niż na charakterystyce fabrycznej, gdzie miał 45 Nm w zakresie prędkości obrotowej 2500 do 4000 1/min.

Dalsze zmiany regulacyjne układu zapłonowego, badanego silnika nie przyniosły spodziewanych rezultatów, co przedstawia rys.9.13. Zmiany te polegały na zwiększeniu odstępów elektrod do 1,1 mm i zmniejszeniu indukcyjności cewki zapłonowej  $L_1$  do wartości  $\frac{1}{4}$  wartości znamionowej. Maksymalną wartość momentu obrotowego badany silnik uzyskał przy prędkości obrotowej 2900 1/min, wynoszącą 50 Nm, tj lepiej niż na charakterystyce fabrycznej. Zwiększenie odstępów elektrod oraz zmniejszenie indukcyjności cewki zapłonowej spowodowało przesunięcie maksimum momentu obrotowego w kierunku większych prędkości obrotowych, co jest niekorzystnym z punktu widzenia eksploatacyjnego, gdyż zmniejsza elastyczność silnika. Natomiast korzystnie przedstawiał się przebieg momentu obrotowego w zakresie prędkości obrotowych 1500 do 2900 1/min na co niewątpliwie wpływ miało  $L_1 = \frac{1}{4} L_{1n}$ .

Jako wyjściową charakterystykę do porównania przyjęto charakterystykę pracy silnika ze zmodernizowanym układem zapłonowym przedstawioną na rys.9.12.



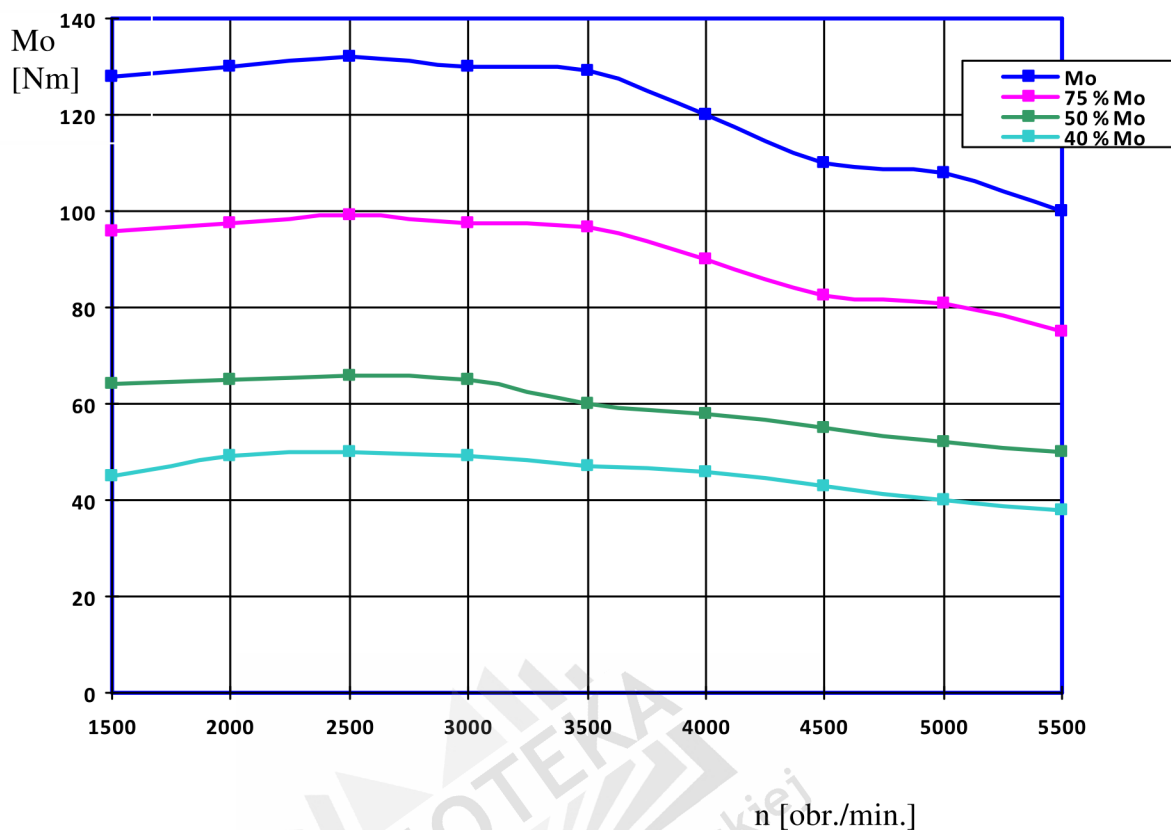
Rys.9.13. Charakterystyka przebiegu momentu obrotowego badanego silnika przy różnych wartościach odstępów elektrod świec zapłonowych.

Mo - powiększony odstęp elektrod świec do 1,1 mm.

Potwierdzeniem faktu, że powiększenie odstępów elektrod nie przynosi korzystnych rezultatów uzyskano przy badaniach z odstępem 1,1 mm, co pokazano na rys.9.13. Jednocześnie stwierdzono, że dalsze badania silnika 1,5 SLE/AA nie dadzą spodziewanych rezultatów i postanowiono dalsze badania prowadzić na silniku i bardziej nowoczesnym układzie zasilania tj wtrysku jednopunktowym sterowanym elektronicznie.

### 9.5.2. Pomiary silnika 1,6 GLI

Badani silnika rozpoczęto od wykonania charakterystyki częściowych momentów obrotowych podobnie jak przy poprzednim silniku.



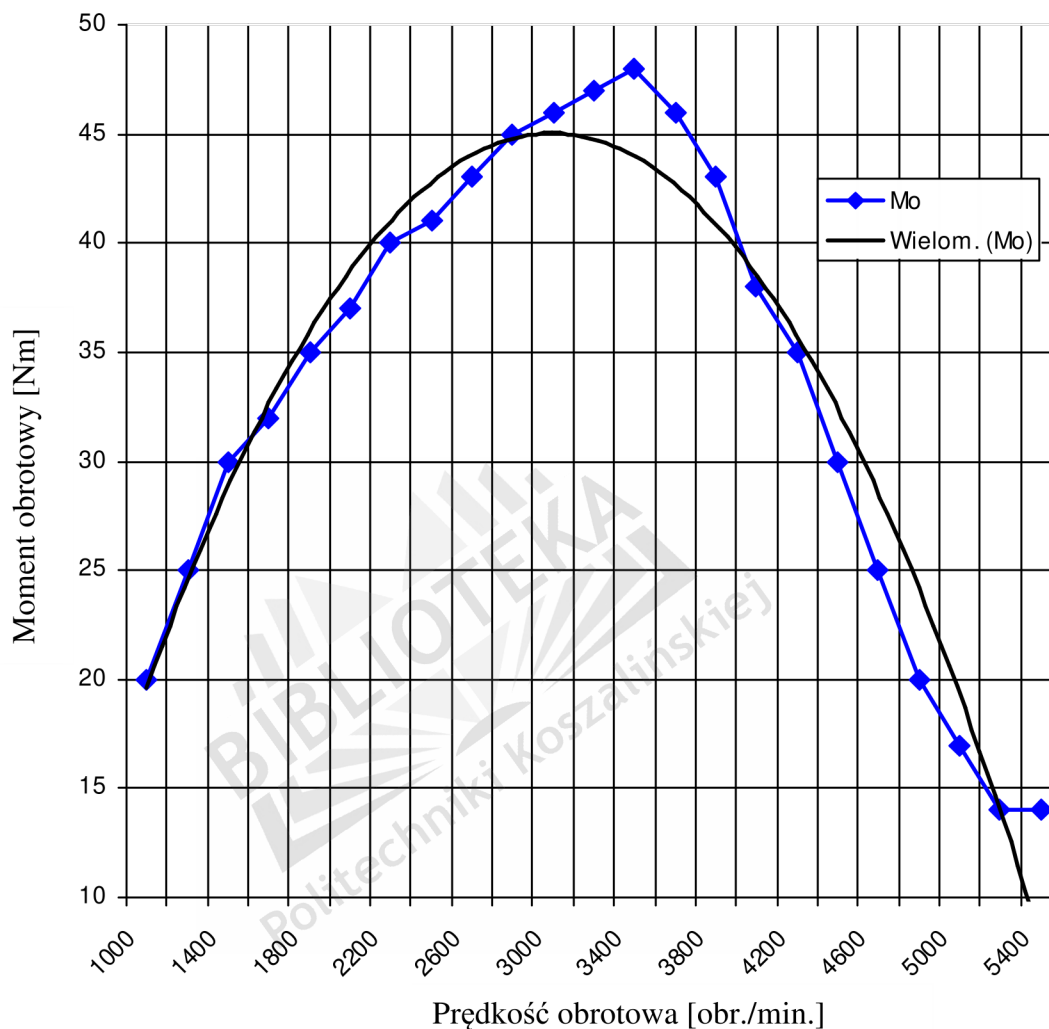
Rys.9.14. Charakterystyka momentu obrotowego silnika 1,6 GLI przy obciążeniach częściowych

Z charakterystyki tej widać, że przy obciążeniach częściowych (40 i 50 %) przebieg momentu obrotowego jest bardziej płaski, co obniża elastyczność silnika przy jeździe pojazdu na jego mocy częściowej. Jednocześnie maksymalna wartość momentu obrotowego wynosiła 132 Nm przy prędkości obrotowej silnika 2500 1/min, a więc różniła się od katalogowej (125 Nm przy 3200 1/min) przy mocy w granicach 57 kW.

Następnie wykonano charakterystykę silnika dla standardowego układu zapłonowego tj. wartości odstępów między elektrodami 0,8 mm, dla wartości momentu obrotowego silnika równej 40 % momentu znamionowego uzyskując przebieg krzywej momentu jak na rys.9.15. Maksymalna wartość momentu obrotowego wyniosła 47 Nm przy prędkości obrotowej 3500 1/min. Na rysunku tym wyznaczono też linię trendu dla uzyskanych wyników, którą opisuje równanie  $y = - 0,2556 x^2 + 5,6058 x + 14,298$ . Na podstawie linii trendu oraz wyników pomiarów przedstawionych na rys.9.15 wyznaczono współczynnik rozbieżności między obydwoma krzywymi zgodnie z wzorem :

$$\alpha^2 = \alpha^2 / n s^2 \quad (9.6)$$

Świadczy to o prawidłowości przeprowadzonych pomiarów i pozwala na wnioskowanie co do ich celowości ich stosowania badanego dla badanego silnika. Współczynnik rozbieżności wyznaczono znana w statystyce metodą [25, 52] w oparciu o dane zawarte na rys.9.15 oraz w tabeli 9.1.



$$M_o = -0,2556n^2 + 5,6058n + 14,298$$

Rys.9.15.Charakterystyka momentu obrotowego silnika m1.6 GLI CF ze standardowym układem zapłonowym dla 40 % obciążenia

Na rys.9.15 przedstawiono przebieg krzywej momentu obrotowego silnika 1.6 GLI CFze standardowym układem zapłonowym. Maksimum momentu obrotowego wynosi 48 Nm przy prędkości obrotowej 3500 1/min. Na tle wyników pomiarów wrysowano linię trendu wyznaczona metodą wielomianową i dokonano wyznaczenia zgodności wyników pomiarów z linią trendu. Pozwoliło to na potwierdzenie prawidłowości wyników badań i wnioskowanie co do celowości ich stosowania. Współczynnik zgodności wyznaczono znana w statystyce metodą [25] zgodnie z zawartymi danymi na rys.9.15 i w tabeli 9.1.

Tabela 9.1.

Obliczenia współczynnika zgodności  $\infty$ 

Lp.	Wartość rzeczywista y	Wartość teoretyczna y <sub>i</sub>	Różnica y-y <sub>i</sub> = $\alpha$	$\alpha^2$
1.	20	20	0	0
2.	25	25	0	0
3.	30	28	2	4
4.	32	32	0	0
5.	35	36	- 1	1
6.	37	38,5	- 1,5	2,25
7.	40	41,5	- 1,5	2,25
8.	41	43	- 2	4
9.	43	44	-1	1
10.	45	45	0	0
11.	46	45	1	1
12.	47	39,5	2,5	6,25
13.	48	43	5	25
14.	46	43,5	2,5	6,25
15.	43	41	2	4
16.	38	38	0	0
17.	35	35	0	0
18.	30	32	2	4
19.	25	28	- 3	9
20.	20	25	- 5	25
21.	17	20	- 3	9
22.	14	14	0	0
23.	14	10	4	16
			$\pi$	120,0

Wariancja cechy wynosi  $s^2 = 54,4165$ , stąd współczynnik niezgodności wyników wynosi zgodnie z wzorem 9.6 :

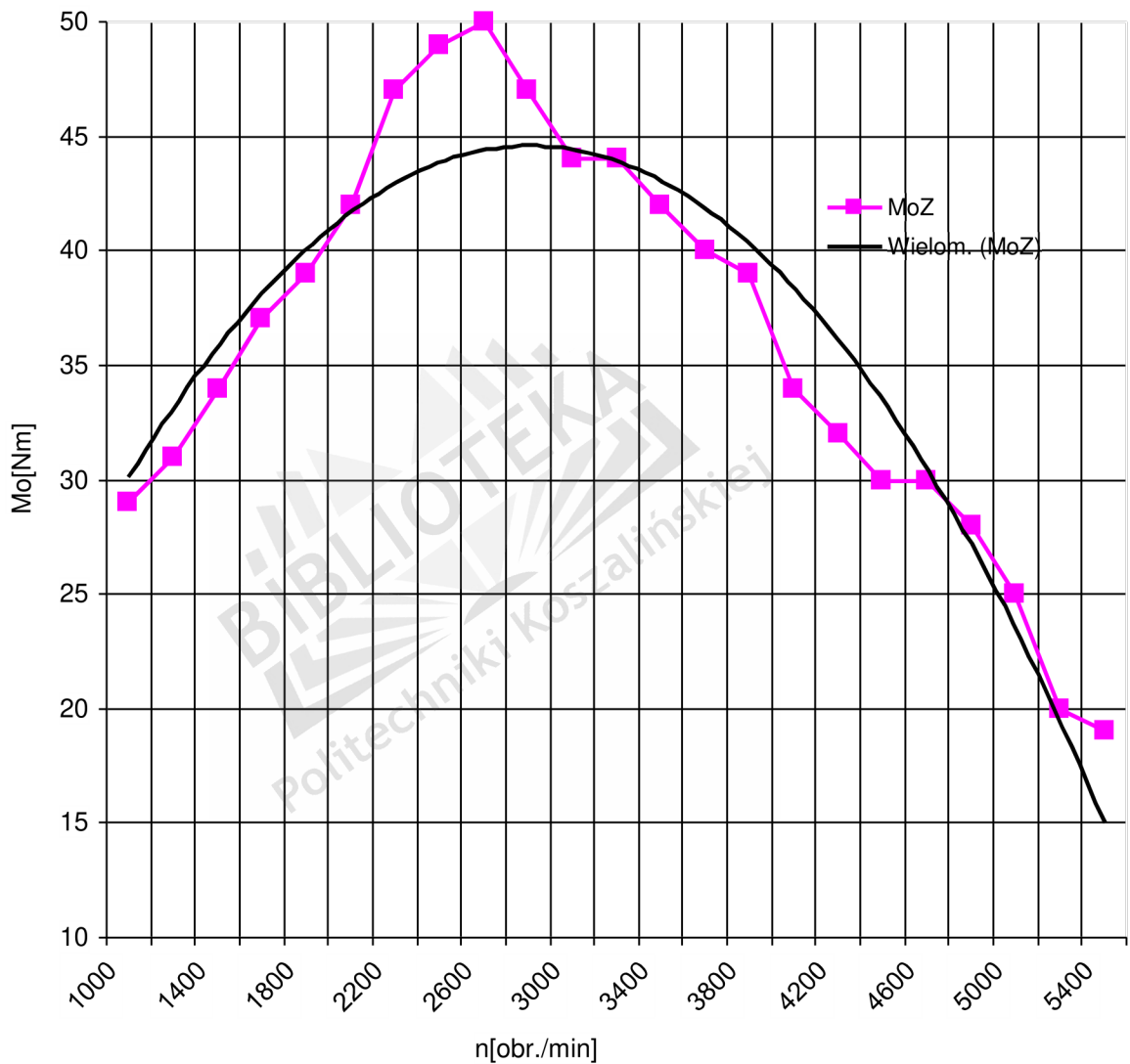
$$\infty = \alpha^2 / n \cdot s^2$$

Gdzie  $n$  – ilość pomiarów

$$\sigma^2 = 120,0 / 23 \cdot 54,4165 = 0,0950 \text{ tj } 9,5 \%$$

Oznacza to, że przeprowadzone pomiary są oraz zgodne z linią trendu w 90,5 %.

Kolejne badania wykonano na silniku ze zmodernizowanym układem zapłonowym tj. zwiększonym odstępem elektrod do 1,1 mm i zmniejszona indukcyjnością cewki zapłonowej  $L$  do wartości  $\frac{1}{4}$  wartości znamionowej, co przedstawia rys.9.16.



$$M_o = -0,1765n^2 + 3,5511n + 26,734$$

Rys.9.16. Charakterystyka silnika 1.6 GLI CF ze zmodernizowanym układem zapłonowym

Na rys.9.16 widać wyraźnie korzystny wpływ zmienionych parametrów układu zapłonowego na przebieg momentu obrotowego silnika, co wyraża się przemieszczeniem maksimum momentu obrotowego w kierunku niższych prędkości obrotowych do 2600 1/min w porównaniu do 3500 1/min w poprzednim układzie oraz maksymalnym momentem

obrotowym 50 Nm w porównaniu do 48 Nm poprzednio. Wykonano też wyznaczenie zgodności wyników pomiarów z linią trendu, opisana jak poprzednio metodą wielomianową.

**Tabela 9.2.**

**Obliczenia współczynnika zgodności  $\infty$**

Lp.	Wartość rzeczywista $y$	Wartość teoretyczna $y_i$	Różnica $y - y_i = \alpha$	$\alpha^2$
1.	29	30	- 1	1
2.	31	33	- 2	4
3.	34	36	- 2	4
4.	37	38	- 1	1
5.	39	40	- 1	1
6.	42	42	0	0
7.	47	43	4	16
8.	49	43	6	36
9.	50	49,5	0,5	0,25
10.	47	44,5	2,5	6,25
11.	44	44	0	0
12.	44	44	0	0
13.	42	43	- 1	1
14.	40	42	- 2	4
15.	39	40	- 1	1
16.	34	38	- 4	16
17.	32	36	- 4	16
18.	33	33,5	- 3,5	12,25
19.	30	30	0	0
20.	27	27	0	0
21.	25	23,5	1,5	2,25
22.	20	20	0	0
23.	19	15	4	16
			$\pi$	138,0

Na rys.9.16 na tle wyników pomiarów wrysowano linię trendu wyznaczona metodą wielomianową i dokonano wyznaczenia zgodności wyników pomiarów z linią trendu.

Pozwoliło to na potwierdzenie prawidłowości wyników badań i wnioskowanie co do celowości ich stosowania. Współczynnik zgodności wyznaczono znaną w statystyce metodą zbliżonych współczynników [21,26] zgodnie z zawartymi danymi na rys.9.16 i w tabeli 9.2.

Wariancja cechy wynosi  $s^2 = 135,300$ , stąd współczynnik niezgodności wyników wynosi zgodnie z wzorem 9.6 :

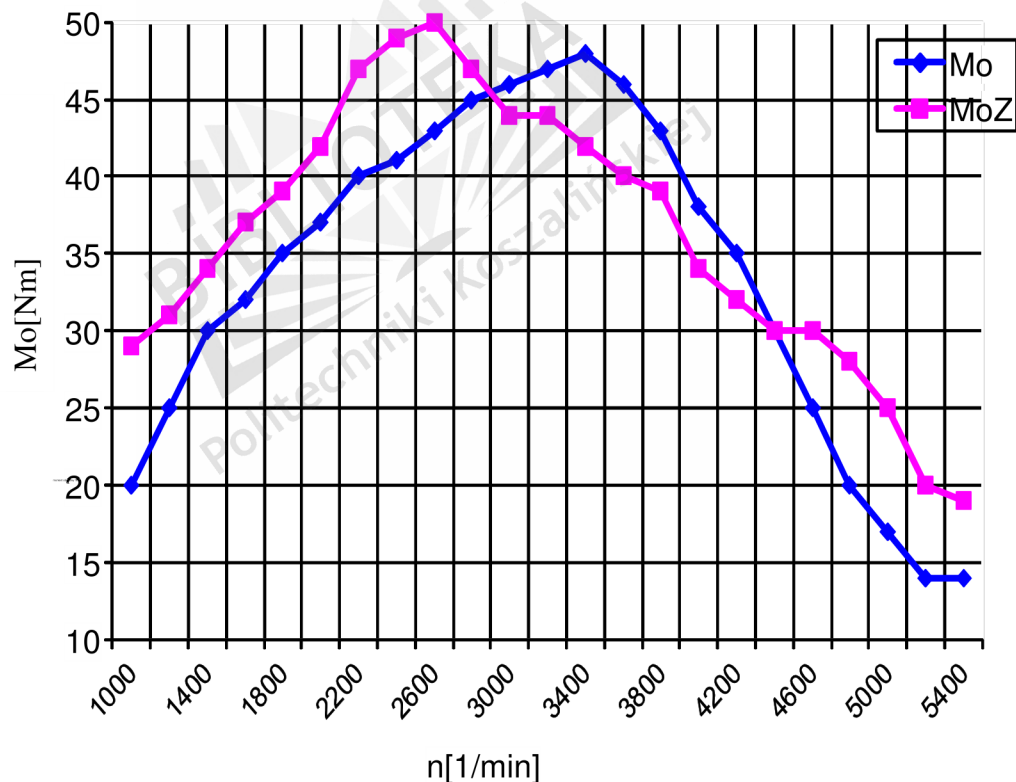
$$\alpha^2 = \alpha^2 / n \cdot s^2$$

gdzie  $n$  – ilość pomiarów.

$$\alpha^2 = 138,0 / (23 \cdot 135,3) = 0,0443 \text{ tj. } 4,43 \%$$

Oznacza to , że przeprowadzone pomiary wykazują zgodność z linią trendu w 95,57 %.

Dla porównania na rys.9.17 przedstawiono nałożone na siebie charakterystyki momentu obrotowego silnika 1.6 GLI CF z wtryskiem benzyny Multec TBI 700 dla 50 % obciążenia przy różnych regulacjach układu zapłonowego.



Rys.9.17. Porównanie przebiegów momentów obrotowych badanego silnika dla różnych regulacji układu zapłonowego

Na rysunku 9.17 widać wyraźnie , że w obydwu przypadkach uzyskano rezultaty zbliżone co do wartości momentu obrotowego jak na charakterystyce fabrycznej z rysunku 9.14, natomiast położenie maksimum momentu obrotowego jest znacznie korzystniejsze przy zmienionych parametrach układu zapłonowego, gdyż wskazuje na znacznie większą elastyczność silnika, co jest bardzo ważnym czynnikiem przy jeździe miejskiej.



## 9.6. Analiza statystyczna powtarzalności pomiarów

Przy prowadzeniu badań opartych na eksperymencie niezmiernie istotnym zagadnieniem jest ocena wiarygodności uzyskiwanych wyników pomiarów. Z tego powodu koniecznym staje się możliwość oszacowania błędów, którymi obarczone są otrzymywane wyniki. Wartość uzyskana w wyniku pomiaru jest zawsze wartością przybliżoną, różniącą się od rzeczywistej o błąd pomiaru. Biorąc pod uwagę fakt, iż dla większości pomiarów występują łącznie zarówno błędy systematyczne jak i przypadkowe, końcową wartość przedstawiono jako błąd całkowity. Błędy systematyczne określono w oparciu o znajomość błędu wynikającego z klasy dokładności użytego przyrządu i błędu odczytu. Natomiast błędy przypadkowe oceniano stosując reguły ze statystyki matematycznej oraz rachunku prawdopodobieństwa. Wyznaczenie błędów pomiaru poszczególnych parametrów przedstawiono na podstawie jednego punktu pomiarowego charakterystyki zewnętrznej, sam pomiar powtarzając trzykrotnie przy trzykrotnych odczytach wartości mierzonych parametrów.

### 9.6.1. Błędy pomiarów bezpośrednich na stanowisku hamownianym

W analizie błędów pomiarów bezpośrednich oszacowano błędy pomiaru następujących parametrów:

- prędkości obrotowej silnika;
- siły hamulca hydraulicznego;
- współczynnika absorpcji promieniowania podczerwonego (zadymienie spalin);
- temperatury spalin;
- czasu zużycia ściśle określonej masy paliwa.

Poniżej przedstawiono przykład analizy przeprowadzonej dla prędkości obrotowej  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ . Przykład analizy statystycznej przedstawiono w oparciu o wyniki pomiarów w punkcie pomiarowym odpowiadającym prędkości obrotowej  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ , dla następujących wartości rozpatrywanych parametrów regulacyjnych: kąt wyprzedzenia zapłonu  $\sim_{\text{ww}} = 20^\circ \text{OWK}$ , wydatek paliwa  $Q_{\text{pal}} = 1,1 \text{ mm}^3/\text{cykl}$ , ciśnienie wtrysku  $p_{\text{wtr}} = (1,0 \pm 0,1) \text{ MPa}$ .

#### 9.6.1.1. Błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika

W ocenie błędu pomiaru prędkości obrotowej brano pod uwagę wyłącznie błąd systematyczny, na który składał się błąd wynikający z klasy przyrządu oraz błąd dokładności odczytu. Ponieważ pomiarów dokonywano dla zadanej (stałej) prędkości obrotowej, w

rozważaniach nie uwzględniono błędu przypadkowego. Dla laserowego tachometru optyczno – stykowego typu DT – 1236L o klasie 1 i maksymalnym zakresie  $19999\text{min}^{-1}$  błąd systematyczny obliczono według wzoru [52]:

$$\delta n_1 \leq \frac{k}{100} z \quad (9.7)$$

$$\delta n_1 \leq \frac{0,1}{100} 19999 \leq 20 \quad \text{min}^{-1}$$

gdzie:

$\delta n_1$  - błąd systematyczny wynikający klasy obrotomierza [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $k$  - klasa przyrządu,  
 $z$  - maksymalny zakres [ $\text{min}^{-1}$ ].

Dla przyjętego punktu pomiarowego ( $n = 2500\text{min}^{-1}$ ) ostateczny wynik można przedstawić w postaci:

$$n = (2500 \pm 20) [\text{min}^{-1}]$$

#### 9.6.1.2. Błąd pomiaru siły hamulca hydraulicznego

Na całkowity błąd pomiaru siły hamulca hydraulicznego typu HH 1 składają się błąd systematyczny i błąd przypadkowy. Pierwszy z nich wynika z błędu dokładności przyrządu  $\delta P_1 = 0,25 \text{ kG}$  oraz błędu odczytu  $\delta P_2 = 0,125 \text{ kG}$ , stąd jego wartość obliczono według wzoru:

$$\delta P = \delta P_1 + \delta P_2 \quad (9.8)$$

gdzie:

$\delta P$  - błąd systematyczny pomiaru siły hamulca [kG],  
 $\delta P_1$  - błąd dokładności dynamometru hamulca [kG],  
 $\delta P_2$  - błąd odczytu [kG].

$$\delta P = 0,25 + 0,125 = 0,375 \text{ kG}$$

W celu obliczenia błędu przypadkowego posłużono się wzorem na średnią arytmetyczną dla  $n = 9$  odczytów mierzonej wielkości:

$$P_{\text{sr}} = \frac{30,50 + 30,25 + 30,25 + 30,00 + 30,00 + 30,00 + 30,25 + 30,25 + 30,25}{9} = 30,19 \text{ kG}$$

Dla prędkości obrotowej  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ , wartości zmierzonych wielkości  $P_i$ , obliczonej  $P_{\text{sr}}$  oraz wyrażeń  $(P_i - P_{\text{sr}})$  oraz  $(P_i - P_{\text{sr}})^2$  przedstawiono w poniższej tabeli:

**Tabela obliczeniowa pomiaru siły hamulca hydraulicznego** **Tabela 9.3.**

Nr pomiaru	$P_i$	$P_{\text{sr}}$	$(P_i - P_{\text{sr}})$	$(P_i - P_{\text{sr}})^2$
1	30,50	30,19	0,31	0,0961
2	30,25		0,06	0,0036
3	30,25		0,06	0,0036
4	30,00		-0,19	0,0361
5	30,00		-0,19	0,0361
6	30,00		-0,19	0,0361
7	30,25		0,06	0,0036
8	30,25		0,06	0,0036
9	30,25		0,06	0,0036
			$\Sigma(P_i - P_{\text{sr}})^2$	0,2224

Odchylenie standardowe średniej arytmetycznej pomiaru siły hamulca dla serii „n” pomiarów dane jest wzorem [47,53]:

$$\delta P_{\text{sr}} = Z t_n \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{\text{sr}})^2}{n(n-1)}}, \quad (9.9)$$

gdzie:

$\delta P_{\text{sr}}$  - odchylenie standardowe średniej arytmetycznej pomiaru siły [kG],

$P_i$  - wartość siły i-tego pomiaru [kG],

$P_{\text{sr}}$  - średnia arytmetyczna pomiaru siły [kG],

$n$  - ilość pomiarów,

$t_n$  - wartość krytyczna rozkładu Studenta zależna od ilości pomiarów i przyjętego poziomu ufności.

Wartość krytyczna rozkładu Studenta dla  $n = 9$  pomiarów przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  (poziom ufności  $1 - \alpha = 0,95$ ) wynosi  $t_n = 2,3060$  [52]. Po podstawieniu do wzoru (9.9), obliczono błąd przypadkowy średniej arytmetycznej pomiaru siły hamulca:

$$\delta P_{\text{sr}} = Z 2,3060 \sqrt{0,2224 \frac{1}{9(9-1)}} = Z 0,13 \text{ kG}.$$

W celu obliczenia całkowitego błędu pomiaru siły hamulca hydraulicznego, dokonano zamiany błędu systematycznego na wielkość stosowaną dla błędu przypadkowego zgodnie ze wzorem [47,53]:

$$\delta^* P = Z \frac{\delta P}{\sqrt{3}}, \quad (9.10)$$

gdzie:

$\delta^*P$  - błąd przypadkowy zamieniony z błędu systematycznego [kG],

$\delta P$  - błąd systematyczny pomiaru siły hamulca [kG].

Całkowity błąd pomiaru obliczono według wzoru [47,53]:

$$\delta P_c = \sqrt{\delta P_{sr}^2 + \delta P^2} \quad (9.11)$$

$$\delta P_c = \sqrt{0,13^2 + 0,216^2} = 0,25 \text{ kG}$$

Wynik pomiaru siły hamulca hydraulicznego dla rozpatrywanego punktu pomiarowego można zapisać w postaci:

$$P = (30,19 \pm 0,25) \text{ [kG]}.$$

### 9.6.2. Błędy pomiarów pośrednich na stanowisku hamownianym

W analizie błędów pomiarów pośrednich oszacowano błędy pomiaru następujących wielkości: mocy efektywnej, momentu obrotowego, godzinowego i jednostkowego zużycia paliwa. Podobnie jak w przypadku określania błędów pomiarów bezpośrednich, przedstawiono przykład analizy przeprowadzonej dla prędkości obrotowej  $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ ,

#### 9.6.2.1. Błąd pomiaru mocy efektywnej

Dla przyjętego do analizy błędów punktu pomiarowego, moc efektywną obliczono według wzoru (9.4):

$$N_e = \frac{M_e n}{4080} = \frac{30,19 \cdot 2500}{4080} = 18,5 \text{ kW}$$

Wzór do obliczenia granicznego błędu pomiaru mocy użytecznej jako wielkości złożonej przyjmuje postać [47,53]:

$$\delta N_e = \sqrt{\left(\frac{J N_e}{J P_{sr}}\right)^2 \delta P_c^2 + \left(\frac{J N_e}{J n}\right)^2 \delta n_c^2} = \sqrt{\left(\frac{n}{4080}\right)^2 \delta P_c^2 + \left(\frac{P_{sr}}{4080}\right)^2 \delta n_c^2} \quad (9.12)$$

gdzie:

- $\delta N_e$  - błąd pomiaru mocy efektywnej [kW],
- $N_e$  - moc efektywna [kW],
- $P_{sr}$  - średnia arytmetyczna pomiaru siły [kG],
- $\delta P_c$  - całkowity błąd pomiaru siły [kG],
- $\delta n_c$  - całkowity błąd pomiaru prędkości obrotowej [ $\text{min}^{-1}$ ].

Ponieważ całkowity błąd prędkości obrotowej jest sumą błędów systematycznych, dokonano jego zamiany na wielkość stosowaną dla błędu przypadkowego [46,52]:

$$\delta^* n_c \approx \frac{\delta n_c}{\sqrt{3}}, \quad (9.13)$$

gdzie:

- $\delta^* n_c$  - błąd przypadkowy zamieniony z błędu systematycznego [ $\text{min}^{-1}$ ],
- $\delta n_c$  - całkowity błąd pomiaru prędkości obrotowej [ $\text{min}^{-1}$ ].

$$\delta^* n_c \approx \frac{20}{\sqrt{3}} \approx 11,55 \text{ min}^{-1}.$$

Błąd pomiaru mocy efektywnej obliczony wzorem (7.9) wynosi:

$$\delta N_e \approx \sqrt{\left(\frac{2500}{4080}\right)^2 \cdot 0,25^2 + \left(\frac{30,19}{4080}\right)^2 \cdot 11,55^2} \approx 0,17 \text{ kW}.$$

Błąd względny (procentowy) obliczono z zależności [52]:

$$\delta N_{e\%} \approx \frac{\delta N_e}{N_e} \cdot 100\%, \quad (9.14)$$

gdzie:

- $\delta N_{e\%}$  - błąd względny (procentowy) pomiaru mocy efektywnej [%],
- $\delta N_e$  - błąd pomiaru mocy efektywnej [kW],
- $N_e$  - moc efektywna [kW],

$$\delta N_{e\%} \approx \frac{0,17}{18,5} \cdot 100\% \approx 0,9\%.$$

Ostateczny wynik pomiaru mocy użytecznej można zapisać w postaci:

$$N_e = (18,5 \pm 0,17) \text{ [kW]}.$$

### 9.6.2.2. Błąd pomiaru momentu obrotowego

Dla przyjętego do analizy błędów punktu pomiarowego przy  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ , moment obrotowy obliczono według wzoru:  $M_o \approx 9550,14 \frac{N_e}{n} \zeta Nm \zeta$ , (9.15)

$$M_o \approx 9550,14 \frac{18,5}{2500} \approx 70,67 \text{ Nm} .$$

Wzór do obliczenia granicznego błędu pomiaru momentu obrotowego przyjmuje postać [47]:

$$\delta M_o \approx \sqrt{\left(\frac{JM_o}{JN_e}\right)^2 \delta N_e^2 + H\left(\frac{JM_o}{Jn}\right)^2 \delta n_c^2}, \quad (9.16)$$

$$\delta M_o \approx \sqrt{\left(\frac{9550,14}{n}\right)^2 \delta N_e^2 + H\left(9 \frac{9550,14 N_e}{n^2}\right)^2 \delta n_c^2},$$

gdzie:

$\delta M_o$  - błąd pomiaru momentu obrotowego [Nm].

Błąd pomiaru momentu obrotowego obliczony wzorem (9.16) [47] wynosi:

$$\delta M_o \approx \sqrt{\left(\frac{9550,14}{2500}\right)^2 0,17^2 + H\left(9 \frac{9550,14 \cdot 18,5}{2500^2}\right)^2 11,55^2} \approx 3,3 \text{ Nm} .$$

Błąd względny (procentowy) pomiaru wynosi [52]:

$$\delta M_{o\%} \approx \frac{\delta M_o}{M_o} \cdot 100\%, \quad (9.17)$$

gdzie:

$\delta M_{o\%}$  - błąd względny (procentowy) pomiaru momentu obrotowego [%],

$\delta M_o$  - błąd pomiaru momentu obrotowego [Nm],

$M_o$  - moment obrotowy [Nm].

$$\delta M_{o\%} \approx \frac{3,3}{70,67} \cdot 100\% \approx 4,67\% .$$

Ostateczny wynik pomiaru momentu obrotowego można zapisać w postaci:

$$M_o = (70,67 \pm 3,3) \text{ [Nm]} .$$

## 10.POSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań i przemyśleń można stwierdzić, że możliwe jest sterowanie energią potrzebną do zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym. Sterowanie poprzez zmianę parametrów elektrycznych układu zapłonowego, a szczególnie indukcyjności i rezystancji obwodu pierwotnego, wpływają na poprawę kształtu impulsu prądu pierwotnego. Poprawa kształtu tego impulsu wpływa korzystnie na przebieg momentu obrotowego silnika. W celu realizacji tych postulatów autor przeprowadził szeroko badania dotyczące wpływu indukcyjności obwodu pierwotnego na prądy oraz napięcia pierwotne i wtórne w układzie zapłonowym klasycznym oraz elektronicznym, wpływu przekładni cewki oraz indukcyjności obwodu pierwotnego na napięcia w układach zapłonowych, wpływu indukcyjności obwodu pierwotnego na ładowanie pojemności obwodu pierwotnego.

Badania te prowadzono w oparciu o rozwiązania autorskie (opatentowane) dotyczące cewki zapłonowej z przesuwym rdzeniem oraz cewki zapłonowej z regulowaną przekładnią. Umożliwiło to sterowanie układem zapłonowym przez wykorzystanie rezonansu napięć w obwodzie pierwotnym oraz sterowanie układem zapłonowym przez zmianę indukcyjności, rezystancji i przekładni cewki zapłonowej. Rezultaty badań poparto analizą statystyczną. Dalszymi konsekwencjami modyfikacji układu zapłonowego jest zwiększenie przerwy na świecach zapłonowych, co wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa.

Opisane wyniki badań układu zapłonowego sprawdzono w odniesieniu do parametrów roboczych silnika spalinowego w trakcie badań hamownianych uzyskując bardzo zachęcające rezultaty przedstawione na rysunkach 10.1. i 9.17. Widać wyraźnie korzystny wpływ zmodernizowanego układu zapłonowego na przebieg momentu obrotowego, co powoduje zwiększoną elastyczność silnika [15,46]. Maksimum momentu obrotowego przesuwa się w kierunku niższych prędkości obrotowych. Jest to korzystna tendencja, gdyż nie wymaga od kierującego pojazdem zwiększania wydatku paliwa.

Jak założono na początku pracy, w trakcie jazdy miejskiej, elastyczność silnika ma bardzo ważne znaczenie ze względu na zdolności przystosowywania się do zmiennych warunków jazdy i związanego z tym zużycia paliwa [12,13,35,45,70]. Przesunięcie prędkości obrotowej maksimum momentu obrotowego z 3500 1/min do 2700 1/min oraz jego przyrost z wartości 47 Nm do 50 Nm wyraża się wzrostem elastyczności podanym niżej zgodnie z rys.9.17 :

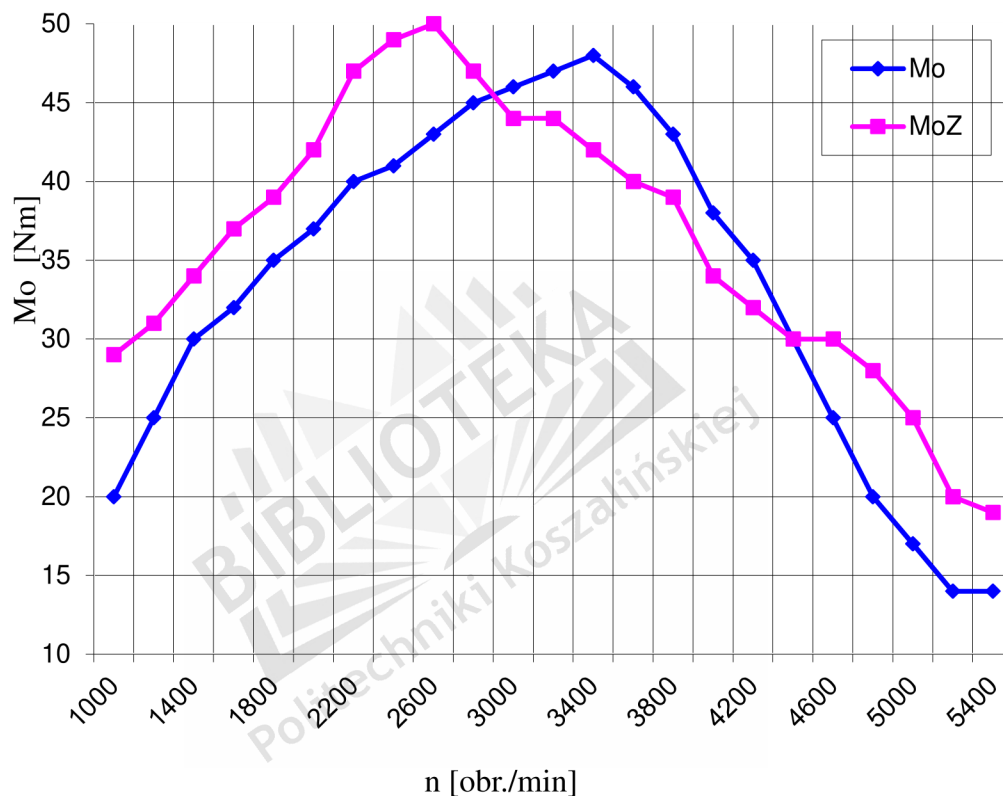
$$E = \frac{M_{omax}}{M_{on}} \frac{n_z}{n_{M_{omax}}} \quad . \quad (10.1)$$

Moment obrotowy standardowy  $E = 47/14 \times 5200/3500 = 3,13 \times 1,48 = 4,63$ .

Moment obrotowy ze zmodernizowanym układem zapłonowym

$$E = 50/19 \times 5200/2700 = 2,63 \times 1,92 = 5,04.$$

Daje to 8,9 % różnicy, co jest rezultatem godnym uwagi ze względu na zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik.



Rys. 10.1. Porównanie przebiegów momentów obrotowych badanego silnika dla różnych regulacji układu zapłonowego

Na rysunku tym parametry korzystniejsze uzyskuje silnik ze zmodernizowanym układem zapłonowym w zakresie prędkości obrotowych 1000 do 3000 1/min i 4400 do 5400 1/min.

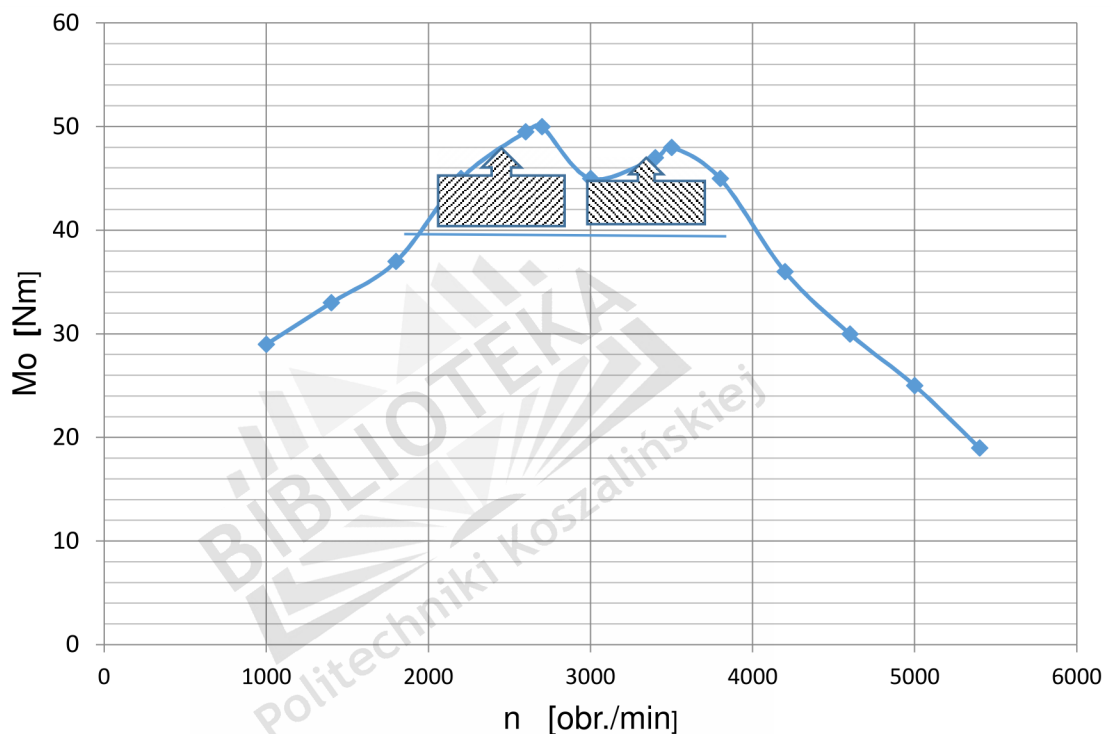
Uzyskane rezultaty są podobne do efektów doładowania dynamicznego opracowanego przez Wicińskiego i Bujaka [72] w latach trzydziestych ubiegłego stulecia. Potwierdziły to badania w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [12,13,35,43,45], możliwości poprawy napełnienia silników spalinowych w granicach 20 %. W rozwiązaniach tych wykorzystano zjawiska przepływowe i geometrię układu dolotowego dla poprawy napełnienia silnika i jego



sprawności, a autor niniejszej pracy poprawę sprawności układu zapłonowego silników o zapłonie iskrowym. Analogia obydwu rozwiązań jest wyraźnie widoczna.

Obserwując rozwój technologii produkcji podzespołów samochodowych, widać, że możliwym jest również sterowanie przerwą świecy zapłonowej w zależności od czynników warunkujących najbardziej efektywną pracę układu.

Na rys.10.2. przedstawiono zbiorczą charakterystykę momentu obrotowego silnika 1.6 GLI CF w przypadku zastosowania rozwiązania umożliwiającą zmianę parametrów roboczych układu zapłonowego.



Rys.10.2. Charakterystyka zbiorcza przebiegu momentu obrotowego silnika 1.6 GLI CF

Na rysunku 10.2. pokazano zakreślony obszar momentu obrotowego w którym powinien poruszać się kierowca podczas jazdy miejskiej w przypadku, gdy będzie możliwość przełączania ustawień układu zapłonowego. Za podstawę przyjęto charakterystykę momentu częściowego wynoszącą 40 %  $M_{o_{max}}$  (rys.9.14). W przypadku możliwości przełączania układu zapłonowego silnika, musiałby być przełączany on w dwóch zakresach prędkości obrotowych: 1000 do 3000 1/min i 4400 do 5400 1/min (rys.10.1). Taki stan rzeczy wpływałby korzystnie na elastyczność silnika i mniejsze zużycie paliwa. Powinno to znaleźć odbicie w dalszych badaniach silnika z takim układem zapłonowym.

## 11. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i rozważań teoretycznych stwierdzono że :

1. Możliwe jest sterowanie przebiegiem momentu obrotowego silnika przez zmianę parametrów roboczych układu zapłonowego.
2. Sterowanie układem zapłonowym zrealizować można przez wykorzystanie rezonansu w obwodzie pierwotnym cewki zapłonowej, zmianę przekładni cewki zapłonowej, zmianę indukcyjności obwodu pierwotnego cewki zapłonowej i rezystancji uzwojenia pierwotnego.
3. Realizację tych zamierzeń przeprowadzono przy wykorzystaniu cewki zapłonowej z regulowaną przekładnią pomysłu autora.
4. Określono wpływ indukcyjności obwodu pierwotnego na prądy i napięcia pierwotne oraz wtórne w układzie zapłonowym klasycznym i elektronicznym.
5. Określono wpływ przekładni cewki na napięcia w układach zapłonowych.
6. Określono wpływ indukcyjności obwodu pierwotnego na ładowanie jego pojemności.
7. Potwierdzono założenia pracy w badaniach hamownianych wybranego silnika o zasilaniu gaźnikowym i wtryskowym.
8. Opisane rezultaty można uzyskać bez zmian konstrukcji układu dolotowego silnika spalinowego, które w dotychczasowych rozwiązaniach służyły poprawie napełnienia silnika i przygotowaniu mieszanki palnej w cylindrze.

W związku z powyższym należy stwierdzić, że cele pracy zostały osiągnięte a hipoteza pracy potwierdzona.

## LITERATURA

1. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P.: Elektromechaniczne Przetworniki Energii z Komutacją Elektroniczną: Seria TEMPUS, Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000.
2. Artykuł redakcyjny: Cewki : AutoElektro nr 22 ,2000.
3. Artykuł redakcyjny: Taiwanese scooter set to pionier New engine: Automotive Engineer nr 2/2006.
4. Artykuł redakcyjny: Silniki FSI/TSI/TFSI z bezpośrednim wtryskiem benzyny. Poradnik serwisowy 2009 wyd. Instalator Polski, Radom 2009.
5. Artykuł redakcyjny: Charakterystyki silników wysokoprężnych Truck SERWIS nr 1/2007, wyd. Radom 2009.
6. Autoelektrik autoelektronik Am Ottomotor Bosch: VDI Verlag 1987r.
7. Bade Shrestha S.O., Ghazi A., Karim J.: The Operational Mixture Limits in Engines Fueled with Alternative Gaseous Fueles: Energy Resour Technology nr 128, 223/2006.
8. Bickerstaffe S. Bio diversity: Automotive Engineer nr 12/2006.
9. Bickerstaffe S. The return of gasoline: Automotive Engineer nr 12/2006.
10. Bunting A.: The fuel alternative: Automotive Engineer nr 11/2006.
11. Christoffel J.: Demonstration board does away with sensors for brushless motors: Automotive engineer nr 12/2006.
12. Cupiał K.: Bezsprężarkowe doładowanie silników spalinowych. Silniki spalinowe nr 4/1972.
13. Cupiał K.: Przyczynek do optymalizacji układu przepływowego tłokowego silnika spalinowego. Ossolineum, Krakow 1976.
14. Christoffel J.: Ruwel advocates copper coints to dissipate heat from PCBs: Automotive Engineer nr 12/2006.
15. Dębicki M.: Teoria samochodu-Teoria napędu: WNT Warszawa 1969.
16. Diebold L., Schindler W., Haug J., Daesch C., Lahti M.: Einspurmodell fur die Fahrdynamiksimulation und- analyse: ATZ nr 11/2006.
17. Dudczak J. Badania układu zapłonowego o zwiększonej energii wyładowania AUTO-Technika Motoryzacyjna nr 2 1986.
18. Dziubiński M.: Badania symulacyjne układu wtrysku benzyny Bosch Motronic: Postępy Nauki i Techniki nr 14/2012.

19. Esposito F., Isastia V., Meo S. Energy Management for Automotive Electric Power System: Przegląd elektrotechniczny nr 2/2006.
20. Fryškowski B.: Samochodowa instalacja elektryczna 42V: Przegląd elektrotechniczny nr 07/08/2004.
21. Fryškowski B.: Diagnostyka bezrozdzielaczowych układów zapłonowych. AutoElektro nr: 159 – 163 wyd. autoelektro 2014.
22. Gajek A. Juda Z.: Czujniki – Mechatronika Samochodowa WKiŁ Warszawa 2006.
23. Griffiths J. More for your money: Automotive Engineer nr 12/2006.
24. Griffiths J. All systems go: Automotive Engineer nr.12/2006.
25. Hellwig Z.: Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej PWN, Warszawa 1995.
26. Herner A. Riehl J.: Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych WKiŁ, Warszawa 2010.
27. Hoche A.: Einsatz verschiedener Ansaug-und Auspuffanlagen an Fahrzeugdieselmotoren und deren Auswirkungen auf des Motorbetriebsverhalten. Materiały Konferencji Naukowej .Politechnika Częstochowska , Częstochowa 1974.
28. Jankowski K. Laboratorium elektrotechniki samochodowej; Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2006.
29. Jarzyński G. Wariatory wyprzedzenia zapłonu AUTO MOTO SERWIS nr 7/8 2005.
30. Kamiński T., Wendeker M., Urbanowicz K., Letak: Cambustion proces in a spark ignitron engine: Dynamics and noise level estimation: Chaos 14/2004.
31. Kasedorf J. Koch R. Service – Fiebold fur die Kfz- Elektrik: Vogel Business Media 2007.
32. Kędzia R.: Cewki zapłonowe wysokiego napięcia, AutoElektro nr 4, 2000.
33. Kimberley W.: Innovate or die: Automotive Engineer nr 4/2006.
34. Kobryń J., Wilk K.: Analiza doboru parametrów niezbędnych do określenia bilansu energii silnika spalinowego: Zeszyty naukowe. Transport/ Politechnika Śląska rok 2003.
35. Kordziński Cz., Środulski T.: Układy dolotowe silników spalinowych. WKiŁ, Warszawa 1964.
36. Korsawe J., Wojke B., Kieltsch M., Heberling A.: Aulegung und Berechnung von Abgasanlagen in Konzeptphase: ATZ nr 2/2007.
37. Krimmel H., Deiss H., Runge W., Schürr H. Elektronische Vernetzung von Antriebsstrang und Fahrwerk ATZ nr 5/2006.
38. Kurdziel R. Podstawy elektrotechniki WNT Warszawa 1973.

- 39.Liedl G., Schnöcker D., Geringer J., Graf J., Klawatsch D., Lenz H. P., Piock W. F., Jetzinger M., Kapus P.: Laser inducted ignition: SPIE 2006.
- 40.Lipinski H-J., Bäumann P.: Motoren, Getriebe, Fahrwerk Dynamische Windgeschwindigkeiten: ATZ nr 5/2006.
- 41.Masewicz T.: Radioelektronika dla praktyków: WKŁ, Warszawa 1986.
- 42.Michalczewski A.: Komputerowa symulacja silnika o zapłonie iskrowym zasilanego z uwzględnieniem rodzaju paliwa: Archiwum Motoryzacji nr ½ , Warszawa 1998.
- 43.Mysłowski J.: Pojazdy samochodowe. Doładowanie silników. WKiŁ, Warszawa 2006.
- 44.Mysłowski J.: Tendencje w budowie szybkoobrotowych silników wysokoprężnych. Instytut Badań i Ekspertyz Naukowych, Gorzów Wlkp. – Łągów Lubuski 2000.
- 45.Mysłowski J.: Doładowanie bezsprężarkowe silników z zapłonem samoczynnym. WNT, Warszawa 1995.
- 46.Mysłowski J., Kołtun J.: Elastyczność tłokowych silników spalinowych. WNT, Warszawa 2000.
- 47.Myszkowski S.: Bezpośredni wtrysk benzyny : AUTO MOTO Serwis nr 4/2007.
- 48.Ocioszyński J. Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych WSiP Warszawa 1996.
- 49.Pachowiak M.: Sterowniki samochodowe: Sterowniki samochodowe AutoElektro nr: 123 – 134 wyd. autoelektro 2011.
- 50.Pachowiak M.: Sterowniki samochodowe: AutoElektro nr 135 – 146 wyd. autoelektro 2012.
- 51.Pachowiak M.: Sterowniki samochodowe: AutoElektro nr147 wyd. autoelektro 2013.
- 52.Pastusiak W.: Elementy analizy błędu doświadczalnego. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1985.
- 53.Overkott H. W., Grohn R., Görnig T.,Ebner A., Roth G.: Intelligenter Aktor für universelle Fahrzeuganwendungen: ATZ nr 7-8/2006.
- 54.Polit R.: Świece zapłonowe a gaz LPG: AUTO MOTO Serwis nr 5/2005.
- 55.Polska Norma: Pojazdy silnikowe. Wyposażenie elektryczne. Ogólne wymagania i badania. PN- 85/S- 76001.
- 56.Praca zbiorowa pod redakcją Wincentego Lotko: Laboratorium diagnostyki samochodów: Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2005.
- 57.Praca zbiorowa pod redakcją T. Rewaja: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej. Szczecin 1998.
- 58.Praca zbiorowa: Sterowanie silników o zapłonie iskrowym. Zasada działania. Podzespoły. Wydawnictwo WKŁ 2013. Seria: Informatory Techniczne Bosch.

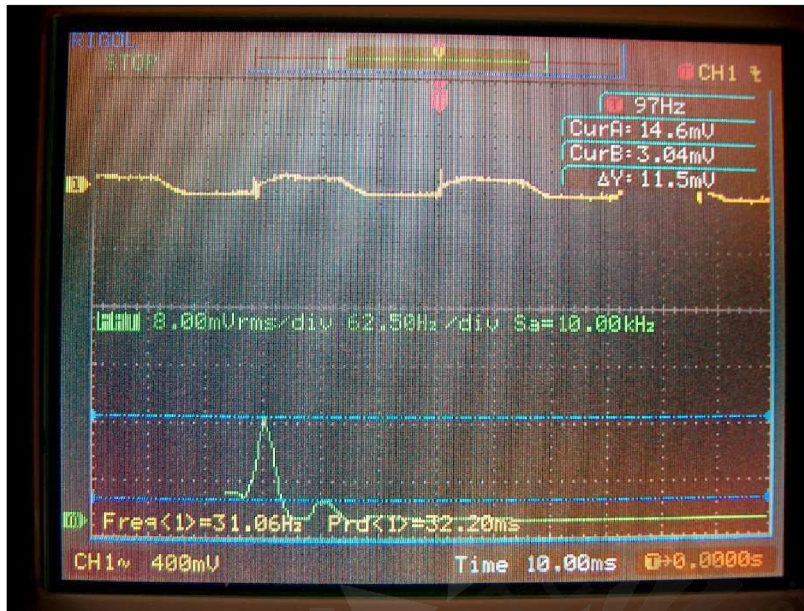
59. Puchała A.: Elektromechaniczne przetworniki energii: Praca wydana pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN przez Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych: Katowice luty 2002.
60. Pullin J.: Maximum effect: Automotive Engineer nr 5/2006.
61. Poradnik Serwisowy: Silniki FSI/TSI/TFSI nr 8/2009.
62. Radecki J.: Analiza wpływu wybranych czynników na skuteczność zapłonową świecy w warunkach rozruchów silników z zapłonem iskrowym: Praca doktorska Szczecin 1976r.
63. Rawski F.: Spalanie normalne, stukowe, detonacyjne: AUTO MOTO Serwis nr 2/2007.
64. Rokosch U.: Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodu OBD. WKŁ Warszawa 2007.
65. Schneehage G.: czujniki układu sterowania silnika: WKŁ, Warszawa 2013.
66. Świerc K.J. Układ zapłonowy z przyspieszonym gromadzeniem energii w cewce: Technika motoryzacyjna 1976r.
67. Tranter A. Automobile electrical & electronic systems: Haynes Publishing Group England 1993.
68. Trzeciak K.: Diagnostyka samochodów osobowych: WKŁ, Warszawa 2010.
69. Turner J., Pearson R.: Driving powertrain efficiency forward through healthier competition: Automotive Engineer nr 1/2004.
70. Ubysz A.: Energochłonność samochodu a zużycie paliwa w złożonych warunkach ruchu. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- 71 70. Urbanowicz M.: Wpływ wybranych parametrów wewnętrznych na pracę bateryjnego układu zapłonowego: Wydawnictwo Katedry Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Szczecińskiej. Zeszyt nr 12. Szczecin 2004.
72. Urbanowicz M.: Badanie bateryjnego układu zapłonowego o zmiennej przekładni cewki zapłonowej: Wydawnictwo Katedry Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Politechniki Szczecińskiej. Zeszyt 14. Szczecin 2006r.
73. Wiciński A.: Doładowanie dynamiczne systemu „Wibu”. Przegląd Techniczny Nr 41/1994.
74. Wiśniewski K.: Samochody osobowe. Opisy techniczne i dane regulacyjne :WKŁ, Warszawa 2007.
75. Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe, WNT, Warszawa 2000.
76. Wajand J.A.: Doświadczalne silniki spalinowe. Politechnika w Bielsku – Białej, 1998.
77. Whitworth B. Hybrid concept may give pointer to next Freelander: Automotive Engineer nr 3/2006.

78. Materiały ze strony : [www. auto-online.pl](http://www.auto-online.pl), [www.elfa.se/pl/fakta.pdf](http://www.elfa.se/pl/fakta.pdf)

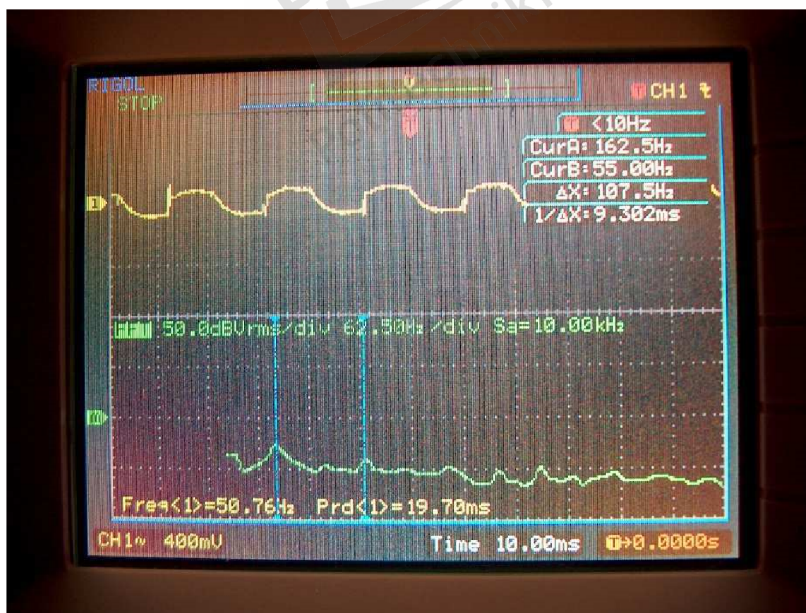


## ZAŁĄCZNIKI:

Załącznik nr1



a

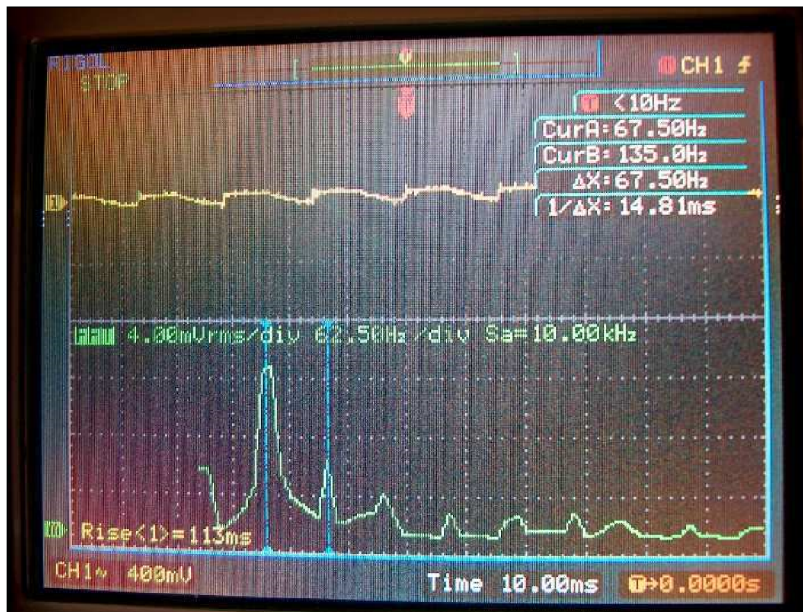


b

Załącznik do rysunku 5.15. a) układ standardowy b) układ zmodyfikowany:  $L=9\text{ mH}$



Załącznik nr2



a



b

Załącznik do rysunku 5.16. Przebiegi prądów w obwodzie pierwotnym z zawartością harmoniczną dla : a) układu standardowego b) zmodyfikowanego

### Załącznik nr3



a



b

Załącznik do rysunku 5.17. Przebiegi prądów w obwodzie pierwotnym z zawartością harmoniczną a) dla układu standardowego b) dla układu zmodyfikowanego

**Tabela 1**

Numer serii	Wartość ustalona prądu[A]	wartość stałej czasowej $\tau$ [ms] (mH/ $\Omega$ )
1	120	180 (18/0,1)
2	20	35(21/0,6)
3	20	30 (18/0,6 i 3/0,1)
4	20	20 (12/0,6)
5	10	15 ( 18/1,2)
6	4	7 ( 21/3)
7	4	6 ( 18/3)
8	20	5 ( 3/0,6)
9	4	4 (12/3)
10	10	2,5 ( 3/1,2)
11	4	1( 3/3)

Załącznik do rysunku 7.3

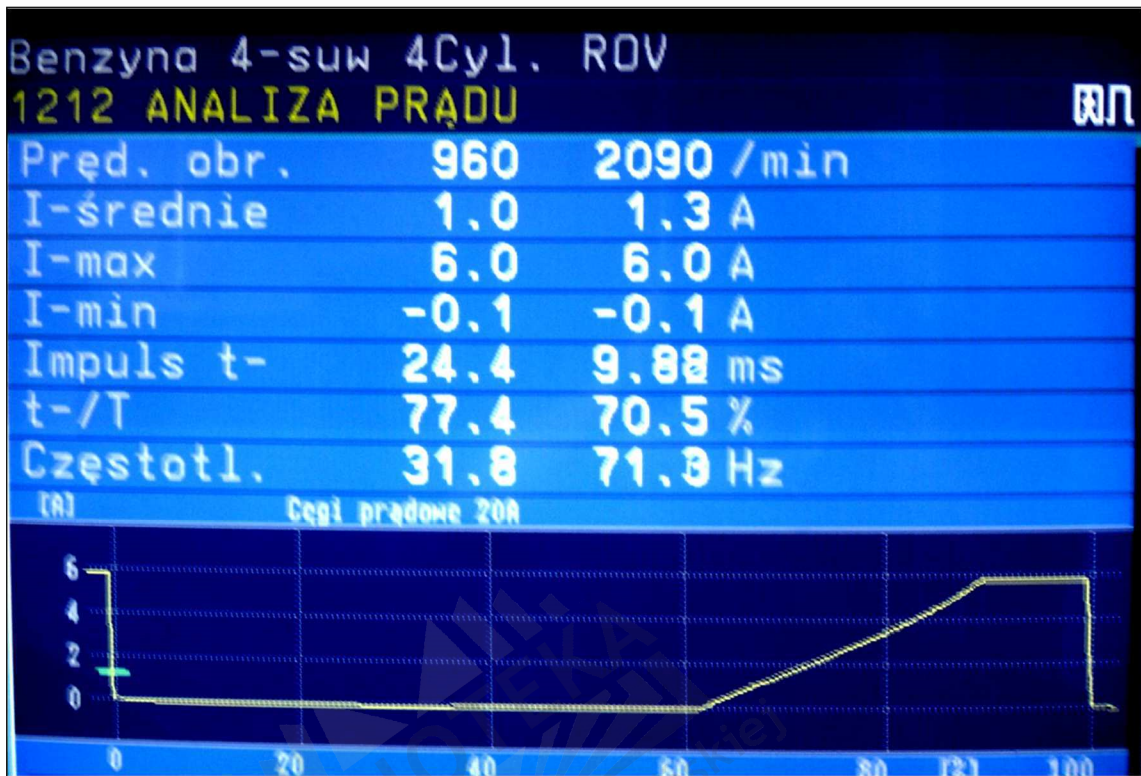


**Tabela 2**

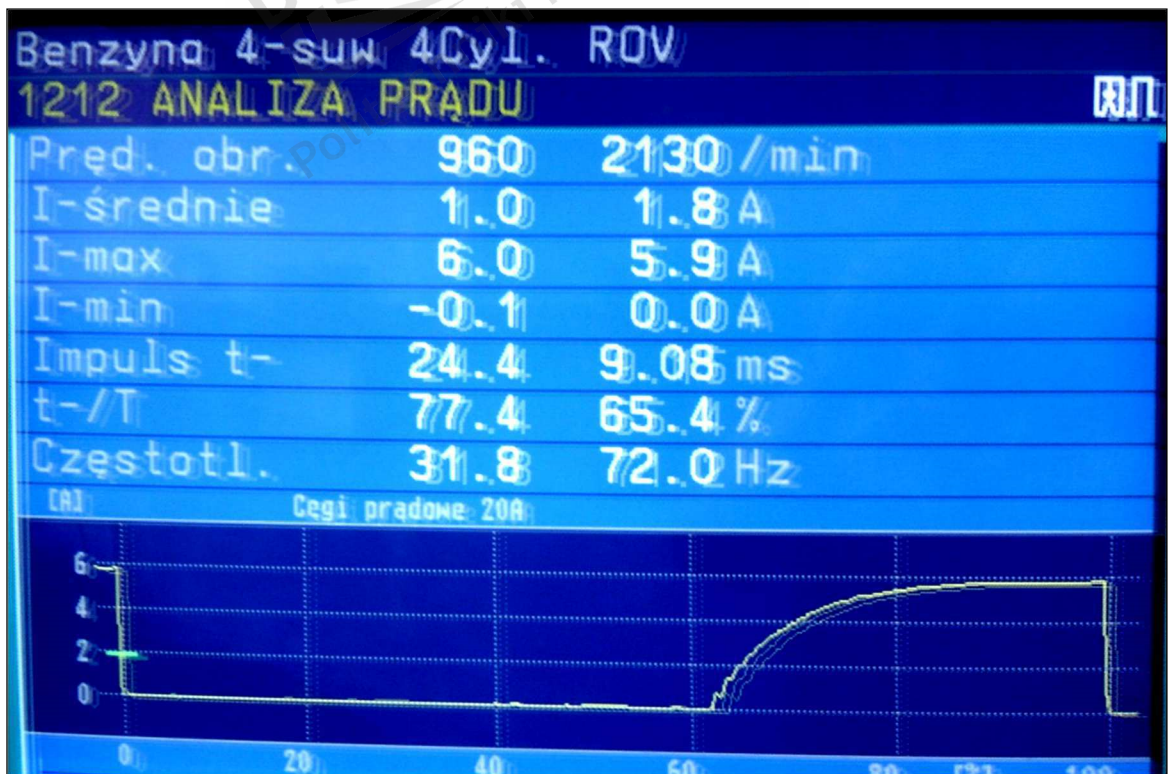
Numer serii	Prędkość obrotowa[obr/min]	Czas zwarcia [s]
1	1000	0,03
2	1200	0,025
3	1400	0,021
4	1600	0,019
5	1800	0,017
6	2000	0,015
7	2200	0,014
8	2400	0,0125
9	2600	0,0115
10	2800	0,011
11	3000	0,01
12	3200	0,009
13	3400	0,0088
14	3600	0,0083
15	3800	0,0079
16	4000	0,0075

Załącznik do rysunku 7.4

Załącznik nr 6

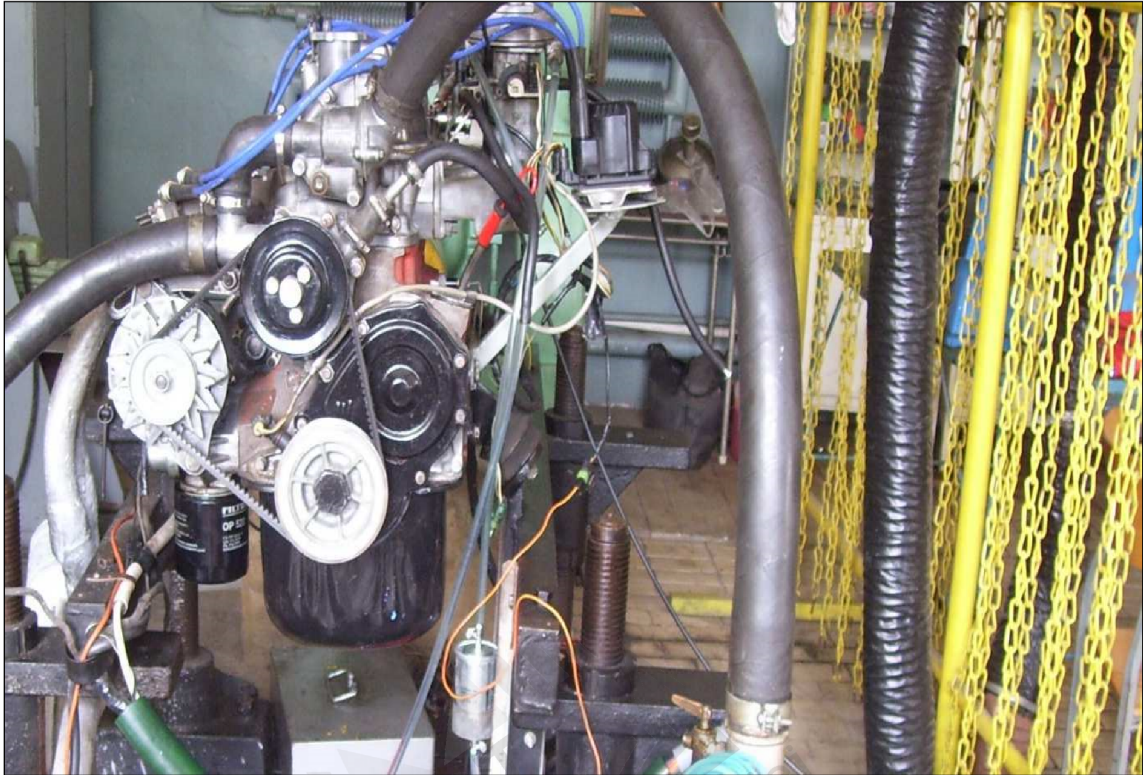


Załącznik do tabeli 8.2



Załącznik do tabeli 8.2

Załącznik nr 7



Silnik sterowany elektronicznie z wtryskiem benzyny Multec TBI 700

Załącznik nr 8

**Prawa patentowe dotyczące istoty badań w rozprawie doktorskiej:**

Treść patentu

Sposób regulacji energii iskry z cewki zapłonowej w samochodzie z zapłonem iskrowym

Przedmiotem wynalazku jest sposób regulacji energii iskry cewki zapłonowej wysokiego napięcia, w samochodzie z zapłonem iskrowym.

Jednym z warunków prawidłowego zapłonu w silniku spalinowym jest zapewnienie dostatecznej energii iskry w możliwie najszerszym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza, ciśnienia sprężania i prędkości zawirowania ładunku. Podstawowe znaczenie mają parametry cewki zapłonowej a przede wszystkim maksymalne napięcie generowane po stronie wtórnej.

Zadaniem konwencjonalnej cewki zapłonowej jest przetwarzanie dostarczanego przez akumulator lub alternator niskiego napięcia na napięcie wysokie w celu wymuszenia przeskoku iskry między elektrodami świecy zapłonowej. Cewka pracuje jako transformator napięcia. Gromadzona w niej energia  $E$  zależy w dużej mierze od parametrów uzwojenia pierwotnego, co wiąże się z wartościami indukcyjności uzwojenia pierwotnego  $L_1$  i natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym  $i_1$ :

$$E = \frac{1}{2} * L_1 * i_1^2$$

Znane i stosowane cewki zapłonowe składają się z dwóch uzwojeń. Uzwojenie pierwotne ma od 250 do 400 zwojów wykonanych z drutu miedzianego o średnicy od 0,2 do 0,8 mm. Uzwojenie wtórne ma zaś od 19000 do 26000 zwojów wykonanych z drutu miedzianego o średnicy od 0,1 do 0,2mm dodatkowo odizolowanych między warstwami przekładkami izolującymi zapobiegającymi przed przebiciami międzywarstwowymi. W układach zapłonowych stosuje się cewki pojedyncze i cewki dwubiegunowe.

Cewka pojedyncza stosowana jest w układach zapłonowych, w których każdemu cylindrowi przyporządkowana jest indywidualna cewka zapłonowa wraz z końcówką mocy sterowana przez sterownik.

Cewki dwubiegunowe stosowane są w bezrozdzielaczowych układach zapłonowych i występują tylko w silnikach o parzystej liczbie cylindrów. Przykładowo dla silnika czterocylindrowego oznacza to, że przeskok iskry na świecach występuje na przemian, odpowiednio w parach cylindrów  $1/4$  oraz  $3/2$ . Ocenia się, że energia iskry w cylindrze, w którym realizowane jest 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.

Niedogodnością stosowanych układów zapłonowych dla silników spalinowych jest sztywne przełożenie transformatora tj. stosunek  $z_2/z_1$ , które dla określonej cewki jest niezmiennie.

Celem wynalazku jest opracowanie sposobu kształtowania wartości energii iskry zapłonowej wytwarzanej przez cewkę zapłonową.

Istota sposobu kształtowania wartości energii iskry zapłonowej według wynalazku polega na tym, że w zależności od mierzonych w trybie ciągłym, wartości obrotów silnika spalinowego, temperatury powietrza i cieczy chłodzącej, ilości oraz zasysanego powietrza położenia przepustnicy, podajemy w odpowiednim momencie, w stosunku do położenia tłoka, określoną każdorazowo wartość energii wysokiego napięcia z cewki zapłonowej, którą regulujemy skokowo, zmieniając odpowiednio przełożenie transformatora cewki zapłonowej  $z_2/z_1$  od 80 do 400.

Korzystnym według wynalazku jest to, że w zależności od wartości mierzonych parametrów dokonuje się zmiany przerwy między elektrodami świecy zapłonowej.

Cewka zapłonowa według wynalazku charakteryzuje się tym, że zawiera układ autotransformatora, gdzie liczba zwojów  $z_2$  uzwojenia wtórnego jest stała natomiast skokowo zmienia się liczba zwojów  $z_1$  uzwojenia pierwotnego, wykonanego w postaci odczepów poszczególnych sekcji.

Przedmiot wynalazku przedstawiony jest w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1- przedstawia schematycznie cewkę zapłonową a fig. 2 - przedstawia charakterystykę zmiany energii iskry zapłonowej w zależności od prędkości obrotowej silnika.

Sposób regulacji energii iskry z cewki zapłonowej w samochodzie z zapłonem realizowany jest poprzez ciągły pomiar obrotów silnika, temperatury powietrza i cieczy chłodzącej, ilości zasysanego powietrza oraz położenia przepustnicy, a w zależności od mierzonych wartości podajemy w odpowiednim momencie, w stosunku do położenia tłoka, określoną każdorazowo wartość energii wysokiego napięcia z cewki zapłonowej. Wartość energii iskry zapłonowej kształtuje się, zmieniając skokowo przełożenie transformatora cewki zapłonowej  $z_2/z_1$  od 120 do 400.

Cewka według wynalazku zawiera: rdzeń wykonany z blach transformatorowych, pakietowanych, uzwojenie pierwotne z odczepami wyprowadzonymi na zewnątrz, uzwojenie wtórne, którego początek jest połączony z końcem uzwojenia pierwotnego. Uzwojenie pierwotne nawinięte jest na wtórnym.

### **Zastrzeżenia patentowe**

#### 1. Sposób regulacji energii iskry z cewki zapłonowej

w samochodzie z zapłonem iskrowym znamienny tym, że w zależności od mierzonych w trybie ciągłym, wartości obrotów silnika spalinowego, temperatury powietrza i cieczy chłodzącej, ilości zasysanego powietrza oraz położenia przepustnicy, podajemy



w odpowiednim momencie, w stosunku do położenia tłoka, określoną każdorazowo wartość wysokiego napięcia z cewki zapłonowej, którą regulujemy skokowo, zmieniając odpowiednio przekładnię cewki  $z_2/z_1$  od 80 do 400.

2. Sposób według zastrz.1 znamienny tym, że w zależności od wartości mierzonych parametrów dokonuje się zmiany przerwy między elektrodami świecy zapłonowej.
3. Cewka zapłonowa zawierająca uzwojenie pierwotne i wtórne znamienna tym że zawiera układ autotransformatora, gdzie liczba zwojów  $z_2$  uzwojenia wtórnego jest stała natomiast skokowo zmienia się liczba zwojów  $z_1$  uzwojenia pierwotnego, wykonanego w postaci odczepów poszczególnych sekcji.

#### Skrót opisu

Przedmiotem wynalazku jest sposób regulacji energii iskry z cewki zapłonowej w samochodzie z zapłonem iskrowym oraz cewka zapłonowa

Sposób regulacji energii polega na tym, że w zależności od mierzonych w trybie ciągłym, wartości obrotów silnika spalinowego, temperatury powietrza i cieczy chłodzącej, ilości zasysanego powietrza oraz położenia przepustnicy, podajemy w odpowiednim momencie, w stosunku do położenia tłoka, określoną każdorazowo wartość wysokiego napięcia z cewki zapłonowej, którą regulujemy skokowo, zmieniając odpowiednio przekładnię cewki  $z_2/z_1$  od 80 do 400.

Cewka zapłonowa według wynalazku charakteryzuje się tym, zawiera układ autotransformatora, gdzie liczba zwojów  $z_2$  uzwojenia wtórnego jest stała natomiast skokowo zmienia się liczba zwojów  $z_1$  uzwojenia pierwotnego, wykonanego w postaci odczepów poszczególnych sekcji.

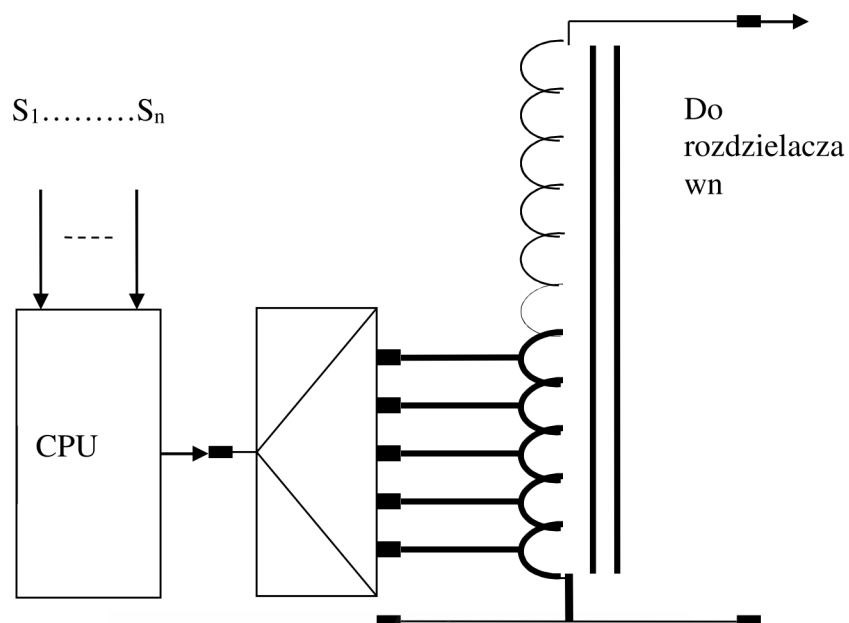


Fig.1 schemat regulowanej cewki zapłonowej

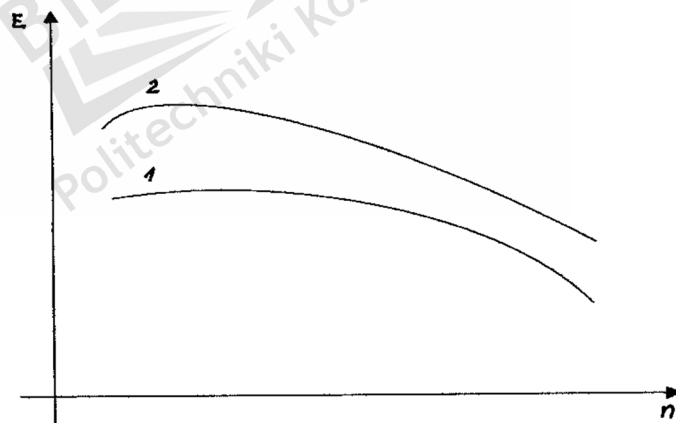


Fig.2 Przebieg energii gromadzonej w indukcyjności uzwojenia pierwotnego w cewce/ trend /: 1 cewka standardowa 2 cewka sterowana

Warszawa, dnia 2009-03-12

**URZĄD PATENTOWY RP**  
**Departament Zgłoszeń**

Al. Niepodległości 188  
00-950 WARSZAWA  
skr.poczt.203

**P-387464**  
Urbanowicz Mirosław  
ul. Zawadzkiego 8/57  
71-246 SZCZECIN

Wasz znak :

**P O T W I E R D Z E N I E**

Urząd Patentowy RP stwierdza, że dnia **2009.03.11** zostało dokonane zgłoszenie w sprawie uzyskania PATENTU na wynalazek pt. :

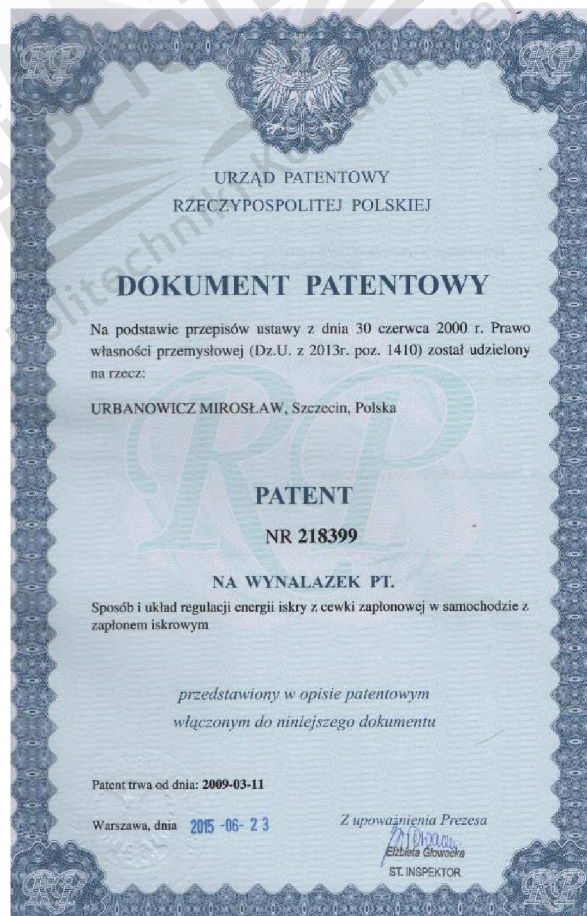
**Sposób i układ regulacji energii iskry z cewki zapłonowej w samochodzie z zapłonem iskrowym**

Zgłoszenie oznaczono numerem **P 387464 \***

[ WIPO ST 10/C PL387464 ]

Zgłaszający :

**Urbanowicz Mirosław, Szczecin**



mgr inż. Mirosław Urbanowicz

## Streszczenie pracy doktorskiej

Temat pracy: Wpływ parametrów układu zapłonowego na charakterystykę silnika

W pracy przedstawiono jej cel to jest: **doświadczalne stwierdzenie możliwości poprawy przebiegu krzywej momentu obrotowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym.** W oparciu o cel pracy założono hipotezę: **Zmiana parametrów elektrycznych obwodu pierwotnego cewki zapłonowej może wpływać na przebieg momentu obrotowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym.**

Dokonano analizy pracy układu zapłonowego na podstawie modelu matematycznego oraz przebiegu procesu spalania w komorze spalania silnika spalinowego. Przeprowadzono analizę czynników konstrukcyjnych cewki zapłonowej wpływających na przebieg procesu tworzenia napięcia pierwotnego i wtórnego. W wyniku analizy określono wpływ indukcyjności własnej uzwojenia pierwotnego jako głównego czynnika wpływającego na jakość sygnału wyjściowego czyli charakterystykę silnika spalinowego o zapłonie iskrowym.

Przeprowadzono analizę istniejących rozwiązań opublikowanych w literaturze poruszających podobną tematykę. Dokonano porównania przebiegów rzeczywistych z przebiegami teoretycznymi.

W oparciu o prototypową cewkę zapłonową, opatentowaną pod nr:218399, przeprowadzono badania na hamowni silnikowej oraz dokonano porównania przebiegów krzywych momentów obrotowych silników z parametrami fabrycznymi i modyfikowanymi. Badania hamowniane przeprowadzono na silniku z zapłonem konwencjonalnym, fabrycznym i modyfikowanym oraz na silniku sterowanym elektronicznie o parametrach fabrycznych i modyfikowanych. Otrzymane charakterystyki silników porównano i poddano analizie statystycznej. Wyznaczono współczynniki korelacji charakterystyk momentów obrotowych. Otrzymane wyniki świadczą o słuszności postawionej hipotezy pracy. Wykonano ponadto charakterystykę ogólną silnika dla różnych przełożeń skrzyni biegów. Przebieg charakterystyki zdecydował o wyborze częściowych obciążeń silnika do wykonania charakterystyk momentów obrotowych. Wyznaczono również charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa badanych silników. Badania potwierdziły słuszność hipotezy pracy, czego wynikiem jest poprawa elastyczności silnika o 8,9%.

mgr inż. Mirosław Urbanowicz

## Summary doctor's work

Theme works: Influence parameters of ignition arrangement on profile of engine

In here in work was introduced was this is: experimental affirming of possibility of improvement course curve rotary moment engine about sparkle ignition.

It the analysis of work of ignition arrangement was executed was on basis of mathematical model as well as the course of process of burning in chamber burning the combustion engine.

It the analysis of constructional factors of ignition coil was conducted was influencing on course of process the creating of primary and secondary voltage.

It the influence of inductance of primary winding in result of analysis was qualified was as main influencing on quality of exit signal factor that is the profile of combustion engine about sparkle ignition.

Analysis was conducted existing solutions published in literature propeling similar subject matter.

It in support about prototype ignition coil, patented under number 218399, investigation was conducted was on investigative position as well as the comparison of courses of curves moments rotatory engines was executed with factory parameters and modified.

It post investigations were conducted was on engine with conventional ignition as well as on steered electronically about factory parameters and modified. Statistical analysis was subjected received results. The coefficients of correlation of profiles rotatory moments were marked.

The received results testify about legitimacy of put hypothesis of work.

It it was executed was moreover the general profile of engine for different shifts of chest of runs. The course of profile decided about choice of partial burdens of profiles rotatory moments.

The profile of isolated waste of fuel was marked for studied engines also.

Investigations confirmed the legitimacy of hypothesis of work, what result improvement of elasticity of engine about 8,9 % is.