

Karol CUPIAŁ*
Michał GRUCA
Janusz GRZELKA

Korelacja fluktuacji pracy indykowanej z fluktuacjami prędkości obrotowej wału korbowego i natężenia prądu generowanego w zespole prądotwórczym

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań korelacji fluktuacji pracy indykowanej z fluktuacjami prędkości obrotowej wału korbowego i natężenia prądu generowanego w zespole prądotwórczym. W przypadku jednocylindrowego agregatu prądotwórczego stwierdzono bardzo wyraźny związek między pracą indykowaną silnika spalinowego a energią elektryczną obliczoną w przedziale czasowym odpowiednio przesuniętym kątowno względem początku cyklu silnika. Praca indykowana kolejnych cykli również dobrze koreluje z przyspieszeniem kątowym wału korbowego w określonej fazie cyklu. Nieco gorsza jest korelacja między amplitudą prądu elektrycznego i pracą indykowaną. Stwierdzono również korelację energii elektrycznej mierzonej w 90 stopniowym oknie kątowym i pracą indykowanej.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, zespół prądotwórczy, indykowanie, praca indykowana, energia elektryczna

The correlation between the fluctuation of the indicated work and the fluctuation of the crankshaft speed and the electric current from a generating set

The paper presents the results of the introductory investigations of the correlation between the fluctuation of the indicated work and the fluctuation of the crankshaft speed and the electric current from a generating set. A clear relationship between the engine indicated work and the electric energy calculated in the time interval angularly shifted regarding the beginning of the engine cycle was stated in the case of the single-cylinder generating set. The indicated work of the consecutive cycles also well correlates with the crankshaft angular acceleration in the determined cycle phase point. A little worse is the correlation between amplitude of electric current and indicated work. The correlation between electric energy calculated in 90 degree angle interval and indicated work was also stated.

Key words: combustion engine, electric generating set, indicating, indicating work, electric energy

1. Wstęp

Celem pracy jest analiza związku niepowtarzalności pracy indykowanej silnika z fluktuacją prędkości obrotowej wału korbowego i z fluktuacją natężenia prądu wytwarzanego w zespole prądotwórczym oraz ocena możliwości wykorzystania pomiaru fluktuacji natężenia prądu wytwarzanego w generatorze elektrycznym do diagnostyki poszczególnych cylindrów silnika i ich sterowania.

W celu znalezienia opisanego związku konieczny jest jednoczesny pomiar przebiegów ciśnień w poszczególnych cylindrach silnika napędzającego generator i pomiar prędkości obrotowej silnika oraz fluktuacji natężenia prądu wytwarzanego w generatorze elektrycznym. Badania te mają za zadanie znalezienie narzędzia do określania najlepszej korelacji między fluktuacjami prądu i prędkości obrotowej a przebiegami ciśnień w poszczególnych cylindrach silnika. Wykorzystanie zmian prędkości obrotowej wału korbowego do oceny jakości pracy silników spalinowych jest przedmiotem licznych badań [1, 5, 10, 12], natomiast brak badań nad zastosowaniem do tego celu natężenia prądu wytwarzanego we współpracującym generatorze elektrycznym. Przebieg chwilowej wartości prędkości obrotowej koła zamachowego silnika i natężenia prądu wytwarzanego w generatorze elektrycznym wykorzystywany będzie do oceny współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej (IMEP COV) [3, 4, 6, 9] dla całego silnika i dla poszczegól-

1. Introduction

The aim of the research is the analysis of the correlation between the engine indicated work and the fluctuation of crankshaft speed and the electric current from a generating set. The research also concerns the usability estimation of the electric current from the measurement of fluctuations of the generating set used for diagnostics and control purposes of particular cylinders of an engine.

The simultaneous measurement of the courses of pressure in individual cylinders of an engine driving the generator and the engine speed as well as the electric current from the generator fluctuations is necessary in order to find the described relationship. The research is performed to find the tool dedicated to estimation of the best correlation between the current and the speed fluctuations and courses of pressure in individual cylinders. The use of crankshaft speed variations for the estimation of engine work quality is the subject of many research works [1, 5, 10, 12]. Unfortunately, there are no research works concerning the use of the electric current from the co-working generator for such analysis. The course of the instantaneous engine flywheel speed and the electric current from the generator will be used to estimate the non-repeatability of the indicated work factor (IMEP COV) [3, 4, 6, 9] for the whole engine and for individual cylinders. Such a measurement system gives significantly more information concerning the pressure and the

nych cylindrów. Taki system pomiarowy dostarczy znacząco więcej informacji o przebiegu ciśnienia i pracy indykowanej w poszczególnych cylindrach w porównaniu z aktualnie stosowanymi elektronicznymi systemami diagnostycznymi, które nie dają żadnych informacji o przebiegu ciśnienia w poszczególnych cylindrach i nie pozwalają zidentyfikować, który z cylindrów jest przyczyną zmian prędkości obrotowej wału korbowego silnika spalinowego.

Utrzymywanie współczynnika IMEP COV poniżej wartości dopuszczalnych jest szczególnie istotne dla stacjonarnych silników gazowych z zapłonem iskrowym zasilanych mieszankami ubogimi, ponieważ nawet nieznaczna zmiana chemicznego składu paliwa i przekroczenie wartości granicznych współczynnika nadmiaru powietrza lub okresowe wypadanie zapłonów spowodowane usterką instalacji zapłonowej powoduje widoczny wzrost współczynnika IMEP COV. Praca silnika gazowego z nadmierną wartością IMEP COV jest bardzo niekorzystna, ponieważ powoduje ona szybkozmiennie wahania momentu obrotowego i w konsekwencji powiększa obciążenia mechaniczne układu korbowego i niejednostajność prędkości obrotowej odbiornika mocy napędzanego przez silnik, co jest szczególnie istotne w przypadku silnika napędzającego generator elektryczny w równoległej pracy z innymi generatorami w zrównoważonych systemach energetycznych. Niejednostajność prędkości obrotowej powoduje dość duże wahania natężenia prądu generatora i może inicjować niekontrolowane zadziałanie ograniczeń prądowych. Szacowanie współczynnika IMEP COV na bieżąco (*on-line*) na podstawie przebiegu natężenia prądu będzie dodatkowym wartościowym sygnałem diagnostycznym, który w warunkach eksploatacyjnych pozwoli na bieżąco monitorować i korygować parametry eksploatacyjne gazowego silnika spalinowego oraz zwiększy jego niezawodność.

2. Przedmiot badań

Ze względu na znaczną złożoność zagadnienia zarówno jeśli chodzi o budowę systemu pomiarowego, jak i wzajemny wpływ pracy poszczególnych cylindrów na zmienność prędkości obrotowej silnika oraz wytwarzanego w generatorze prądu, przed przystąpieniem do właściwych badań przeprowadzono badania wstępne na jednocyndrowym agregacie prądotwórczym. Badania te umożliwiły przetestowanie specjalnie przygotowanego systemu pomiarowego, jak również dostarczyły danych pozwalających na dokonanie wstępnej selekcji metod analizy korelacji między zmiennością pracy indykowanej silnika spalinowego a zmiennością parametrów generowanego prądu elektrycznego. Omawiane badania przeprowadzono na stanowisku opisanym w pracy [7]. Ten jednocyndrowy, wolnossący silnik badawczy z zapłonem wielopunktowym, zasilany paliwem gazowym, połączony przekładnią pasową z generatorem elektrycznym asynchronicznym, tworzy dwumasowy układ drgający o częstotliwości skłonnych drgań własnych równej 4,2 Hz. W ramach badań przeprowadzono rejestrację następujących przebiegów:

- ciśnienia w cylindrze silnika,
- trzech napięć fazowych generatora,

indicated work courses in individual cylinders in comparison to the currently applied electronic diagnostics systems, which does not give any information about the pressure in individual cylinders and does not identify the cylinder, that causes the engine crankshaft speed variations.

Keeping the IMEP COV factor below the acceptable values is significantly important in the case of spark ignition stationary gas engines powered with lean mixtures as even slight variation in the fuel chemical composition and the excess of the boundary values of excess air coefficient or temporary misfiring caused by ignition system failure results in a significant increase in IMEP COV value. Gaseous engine work with high IMEP COV value is very unfavourable as it causes fast changes in torque variations and, as a consequence, it increases the mechanical load of the connecting-rod and an unstable speed of the power receiver, which is significantly important in the case of engine driving the electric generator working parallel with other generators in balanced power grid because it results in big fluctuations of the electric current and can trigger the safety devices. On-line estimation of IMEP COV factor on the basis of the current curve will be an additional and valuable diagnostic signal, which will give the possibility to monitor and control the combustion engine work parameters and will improve its reliability during operation.

2. The research object

Before the beginning of the research, preliminary tests were performed on a single-cylinder generating set because of the considerable complexity of both the measurement system design and the mutual influence of individual cylinders work on the engine rotational speed variation not to mention the generated current. This investigation allowed the testing of the designed measurement system and delivered data that enabled the pre-selection of the method of analysis of the correlation between the combustion engine indicated work variation and the parameters of the generated current. The above mentioned tests were conducted on a test stand described in [7]. This single-cylinder, multipoint injection system gas test engine connected with an asynchronous electric generator by a belt transmission forms a two-mass vibration system of free torsional vibration frequency equal to 4.2 Hz. Within the confines of the test a recording of the following curves was performed:

- in-cylinder pressure,
- 3 phase voltage of the generator,
- 3 phase current of the generator,
- crankshaft instantaneous speed,
- generator instantaneous speed.

3. The correlation between the indicated work and the electric current

The preliminary tests of the synchronous registered courses of pressure, crankshaft speed as well as a 3 phase voltage and current were meant to determine the level of correlation between the indicated work of individual cycles and different parameters of the generated current.

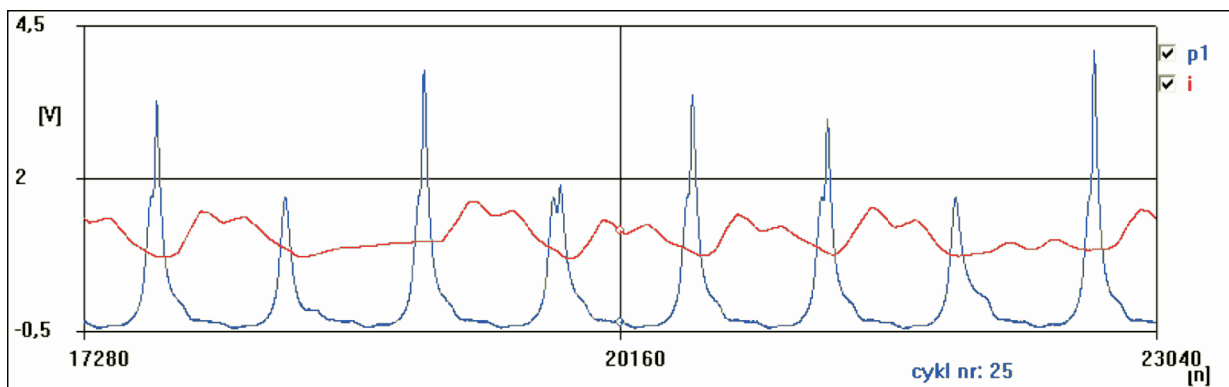
- trzech prądów fazowych generatora,
- chwilowej prędkości obrotowej wału silnika,
- chwilowej prędkości obrotowej generatora elektrycznego.

3. Korelacja pracy indykowanej z natężeniem prądu elektrycznego

Wstępne badania synchronicznie zarejestrowanych przebiegów ciśnienia, prędkości obrotowej wału oraz napięć i natężeń trójfazowego prądu wytwarzanego w generatorze elektrycznym miały na celu określenie stopnia korelacji między pracą indykowaną poszczególnych cykli a różnymi parametrami wytwarzanego prądu.

Pomiary wykonano dla 4 różnych obciążeń silnika spalinowego (p_i równe: 0,33; 0,45; 0,51 i 0,58 MPa), rejestru-

The measurements were performed for four different engine loads (IMEP equal: 0.33; 0.45; 0.51 and 0.58 MPa), recording the above mentioned quantities for 500 cycles in each series. One of the spark plugs, which is located the farthest from the combustion chamber axis was used to ignite the mixture and the ignition was delayed in order to obtain a high level of non-repeatability of the engine work in the following cycles. Fig. 1 shows the exemplary cylinder pressure course and the generated electric current in 8 cycles, registered at the minimum engine load. The high level of diversification of pressure courses and its maximum values are revealed, which is confirmed by the gained IMEP COV value of 36%. The diversification of the current calculated at the point of highest fluctuation level (266°CA after



Rys. 1. Przebieg ciśnienia w cylindrze silnika (p_1) i obwiednia natężeń prądu (i) zarejestrowane w warunkach dużej niepoważności kolejnych cykli

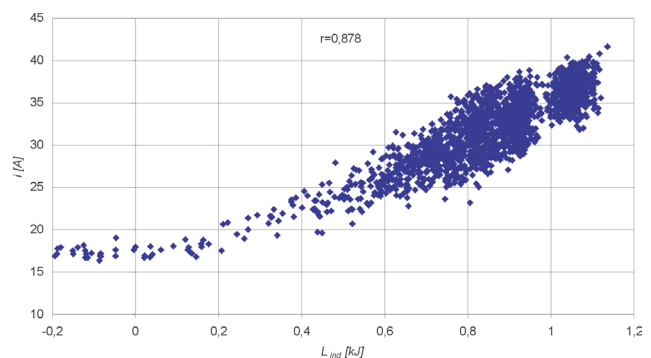
Fig. 1. The cylinder pressure course (p_1) and the envelope of the current (i) registered in the conditions of great non-repeatability of cycles

jąc w każdej serii wyżej wymienione wielkości dla 500 kolejnych cykli. W celu uzyskania znacznej niepoważności pracy silnika w kolejnych cyklach do zapłonu wykorzystano jedną z najbardziej oddalonych od osi komory spalania świec oraz dodatkowo opóźniono zapłon. Rysunek 1 ilustruje przykładowy przebieg ciśnienia w cylindrze oraz przebieg natężenia generowanego prądu w ciągu 8 cykli zarejestrowany przy najmniejszym obciążeniu silnika. Widoczne jest znaczne zróżnicowanie przebiegów i wartości maksymalnych ciśnienia, czego potwierdzeniem jest osiągnięta wartość współczynnika IMEP COV na poziomie 36%. Natomiast zmienność natężenia prądu obliczona w punkcie jej największych fluktuacji (266°OWK po GMP) wynosi około 15%. Chwilowe natężenie prądu elektrycznego zostało wyznaczone jako obwiednia modułów natężeń prądów we wszystkich fazach. Mimo dużych zmian natężenia i faz prądów, nie stwierdzono zmian amplitudy i fazy napięć, które miałyby związek ze zmiennością pracy silnika spalinowego.

Dla większych obciążeń silnika obserwowano znacznie mniejszą niepoważność pracy silnika (współczynnik IMEP COV na poziomie od 3 do 5%), ale za to większe zmiany natężenia prądu, bo na poziomie od 5 do 9%. Na zmienność natężenia prądu miała wpływ nie tylko zmienna praca indykowana silnika spalinowego, ale niestety również prądy bierne i wynikające z mocy biernej zakłócenia elektryczne w sieci energetycznej. Wykonana analiza stopnia

TDC) reached the value of 15%. The instantaneous electric current was calculated as the envelope of the current in all the phases. The changes in the voltage amplitude and phase, which could be related to the variation of the engine work was not stated despite a high variation of voltage and the current phases.

Lower engine work non-repeatability (IMEP COV in the range of 3 to 5%) but greater electric current variations in the range of 5 to 9% were observed at higher engine loads. The electric current variations were influenced not only by the variations of engine indicated work but also by the reac-



Rys. 2. Korelacja między wartością pracy indykowanej (L_{ind}) i natężeniem prądu (i) występującym 266°OWK po GMP

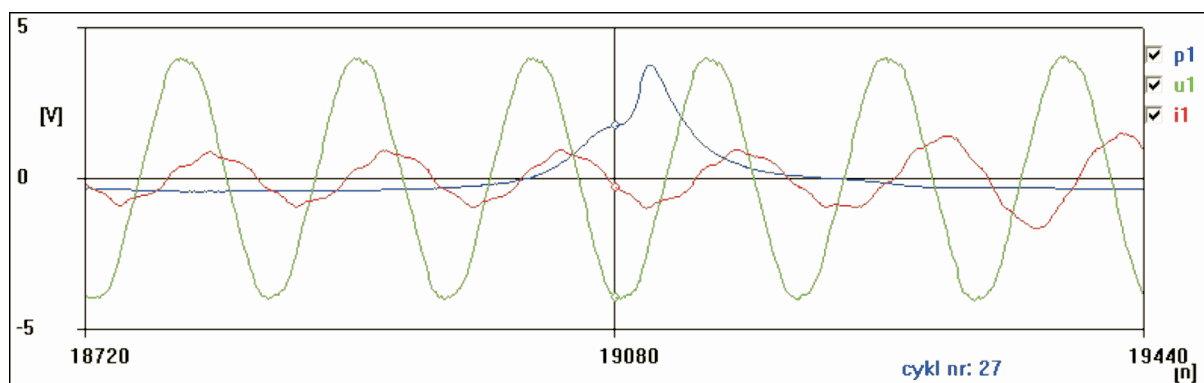
Fig. 2. Correlation between the indicated work and the electric current at 266°CA after TDC

korelacji między pracą indykowaną wykonaną w poszczególnych cyklach silnikowych a natężeniem prądu wykazała, że istnieje między nimi wyraźny związek (rys. 2). Najwyższy stopień korelacji ($r = 0,878$) występuje między pracą indykowaną i natężeniem prądu w punkcie największych fluktuacji natężenia (266°OWK po GMP).

Mimo dużej wartości współczynnika korelacji, związek między badanymi parametrami nie jest zadowalający, na co wpływ mają nie tylko wspomniane zakłócenia w sieci energetycznej, ale również fakt, że moc elektryczna czynna generatora zależy nie tylko od natężenia prądu, ale również od kąta przesunięcia fazowego między napięciem i natężeniem prądu. W czasie badań stwierdzono, że kąt przesunięcia fazowego zmienia się w ciągu cyklu silnikowego nawet o 60°

tytu current and the interference in the power grid resulting from the reactive power. The performed analysis of the level of correlation between the indicated work in individual engine cycles and the electric current revealed that there is a distinct relationship between them (Fig. 2). The highest correlation level ($r = 0.878$) occurs between the indicated work and the electric current at the point of highest current fluctuations (266°CA after TDC).

Despite the high value of the correlation factor the relationship between the examined quantities is not satisfactory as it is influenced not only by the above mentioned interference in the power grid but also by the fact that the active electric power of the generator is dependent on both the electric current and the phase angle between the voltage and the



Rys. 3. Przykład zmian natężenia prądu elektrycznego i jego przesunięcia fazowego względem napięcia

Fig. 3. The example of the current variation and the current phase shift relative to voltage

(rys. 3), co ma istotny wpływ na wartość mocy elektrycznej czynnej, a co z tego wynika, również na ilość wytworzonej energii elektrycznej.

4. Korelacja pracy indykowanej z wytwarzaną energią elektryczną

Ze względu na nieliniowy związek między natężeniem prądu (wyznaczonym jako obwiednia modułów natężeń prądów z trzech faz) i mocą czynną prądnicy przeprowadzono kolejne badania, które miały na celu określenie stopnia korelacji między pracą indykowaną poszczególnych cykli a energią elektryczną wytwarzaną przez prądnicę. Z uwagi na znaczne zniekształcenia przebiegu prądów oraz zmienność ich amplitudy i fazy, do obliczenia mocy czynnej nie można wykorzystać znanych z energetyki zależności między napięciem skutecznym, prądem skutecznym i $\cos\varphi$. Dlatego przebieg mocy chwilowej prądu trójfazowego p obliczono na podstawie przebiegów chwilowych napięć i prądów fazowych $u_1, u_2, u_3, i_1, i_2, i_3$:

$$p = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3, \quad (1)$$

Pozwoliło to na wyznaczenie ilości energii elektrycznej wytwarzanej przez prądnicę w zadanym zakresie obrotu wału korbowego silnika:

$$L_{el2} = \int_{t_1}^{t_2} p \, dt = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p \frac{1}{\omega} \, d\varphi, \quad (2)$$

current. The phase angle changes during an engine cycle even in the range of 60° (Fig. 3), which has a great impact on the value of the active electric power and the resultant amount of generated electric energy.

4. The correlation between the indicated work and the generated electric energy

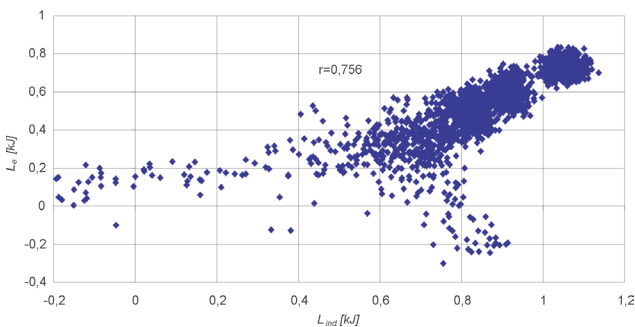
Subsequent tests were performed in order to determine the level of correlation between the indicated work of individual cycles and the electric energy produced by the generator because of the non-linear relationship between the electric current (determined as the envelope of the 3 phase current modules) and the generator active power. Well known energy equations connecting the rms voltage, the rms current and $\cos\varphi$ couldn't be used in the calculations of active power because of the high level of current disturbance and variation in its amplitude and phase. That is why the instantaneous power course of the 3 phase current p was calculated on the basis of instantaneous voltages and phase currents $u_1, u_2, u_3, i_1, i_2, i_3$ as shown in eq. (1).

It allowed the amount of electric energy produced by the generator to be set in the assumed range of crankshaft angle, as in eq. (2), where: $\omega = d\varphi/dt$ indicates crankshaft instantaneous speed.

Fig. 4 illustrates the relation between the indicated work and the electric energy in one cycle for 2000 cycles registered for four different engine loads. As it can be noticed,

gdzie: $\omega = d\varphi/dt$ oznacza chwilową prędkość obrotową wału korbowego.

Rysunek 4 ilustruje zależność między pracą indykowaną a energią elektryczną w jednym cyklu dla 2000 cykli zarejestrowanych przy czterech różnych obciążeniach silnika. Jak widać, korelacja między nimi (współczynnik korelacji $r = 0,756$) nie jest najlepsza. Spowodowane to jest przesunię-



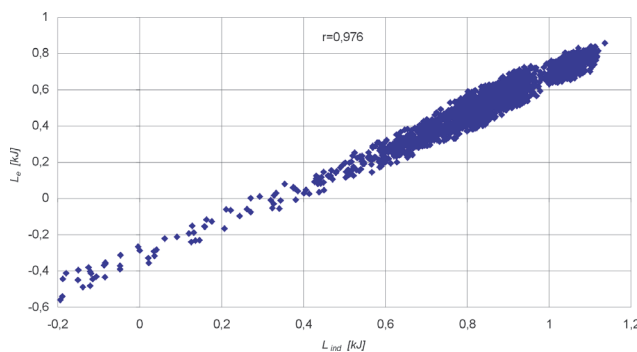
Rys. 4. Korelacja między pracą indykowaną cyklu (L_{ind}) i energią elektryczną (L_e) wytworzoną w tym samym czasie

Fig. 4. The correlation between the indicated work and the electric energy generated at the same time

ciem fazowym między pracą silnika spalinowego a energią wytwarzaną w prądnicie. Przesuwając początek przedziału obliczania energii elektrycznej w stosunku do początku cyklu silnika znaleziono wartość optymalną przesunięcia fazowego ($\Delta\varphi = 500^\circ\text{OWK}$), przy której korelacja między pracą indykowaną cykli a energią elektryczną jest największa i osiąga wartość $r = 0,976$ (rys. 5). Przesunięcie to jest skutkiem mechanicznych zjawisk dynamicznych występujących w dwumasowym układzie: silnik – generator, zawierającym element sprężysty o dużej podatności (paski klinowe), oraz dynamicznych procesów elektrycznych występujących w generatorze.

Należy jednak zauważyć, że w silniku ośmiocylindrowym (który ma być właściwym przedmiotem badań) cykle pracy poszczególnych cylindrów przesunięte są o 90°OWK względem siebie i ich indywidualny wpływ na wielkość momentu obrotowego silnika i prędkość chwilową może być zauważalny tylko w 90 stopniowych przedziałach kątowych obrotu wału silnika, kiedy ciśnienia w tych cylindrach są największe. Dlatego przeprowadzono badania zależności między pracą indykowaną i energią elektryczną wytworzoną w przedziale 90°OWK każdego cyklu przesuwającym kąto-wo. Stwierdzono, że najlepsza korelacja między pracą indykowaną a energią elektryczną obliczoną w takim 90° oknie (dla 2000 cykli zarejestrowanych dla czterech różnych obciążeń silnika) występuje, jeśli pracę indykowaną oblicza się z przedziału od 378 do 468° , a energię elektryczną w przedziale przesuniętym o 399°OWK . Rysunek 6 ilustruje zależność pracy i energii dla tego przypadku, która mierzona współczynnikiem korelacji wyniosła $r = 0,916$. Jeżeli natomiast porówna się pracę indykowaną całego cyklu z energią elektryczną obliczoną w 90° oknie (rys. 7), to korelacja między nimi jest nieco większa i równa $r = 0,923$. W tym

the correlation between them (correlation factor $r = 0.756$) could be better. It is caused by the phase shift between the combustion engine work and the electric energy produced in the generator. The optimal value of the phase shift ($\Delta\varphi = 500^\circ\text{CA}$), at which the correlation between the indicated work and the electric energy is the highest and reaches the value of $r = 0.976$ (Fig. 5) was found by shifting the beginning of the electric energy computational range with respect



Rys. 5. Korelacja między pracą indykowaną cyklu (L_{ind}) i energią elektryczną (L_e) wytworzoną w przedziale od 500° do 1220°OWK

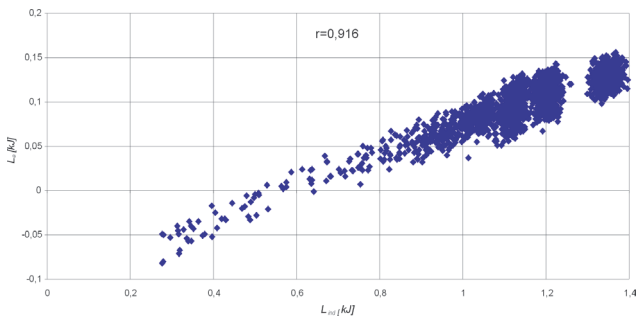
Fig. 5. The correlation between the indicated work and the electric energy generated in the range of 500° to 1220°CA

to the beginning of the engine cycle. This shift is the result of the mechanical dynamic phenomenon occurring in a two-mass system of the engine and the generator joined by an elastic element of great flexibility (V-belts) and the dynamic electric processes in generator.

It must be noted that in the case of eight cylinder engine (which is meant to be the research object) the work cycles of specific cylinders are shifted by 90°CA with respect to each other and their individual influence on the engine torque value as well as instantaneous speed can be noticed only in 90 -degree ranges of crankshaft angle when the pressure in these cylinders gains the highest value. That is why the tests concerning the relationship between the indicated work and the electric energy generated in the angularly shifted range of 90°CA were performed. It has been stated that the best correlation between the indicated work and the electric energy calculated in such a 90° window (for 2000 cycles registered at four different engine loads) occurs if the indicated work is calculated in the range of 378° to 468° and the electric energy in the range shifted by 399° .

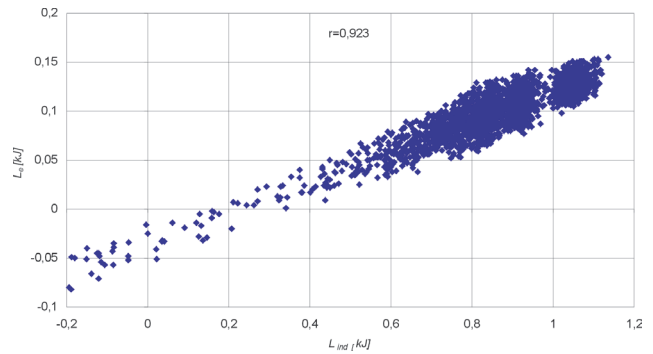
Fig. 6 illustrates the dependency of power and energy in the case in which the dependency reached the value of $r = 0.916$ measured by the correlation factor. The correlation between the indicated work of the whole cycle and the electric energy calculated in a 90° window (Fig. 7) is slightly higher and reaches the value of $r = 0.923$. In this case the 90 degree angular range (for which the electric energy was calculated) was shifted by 780°CA regarding the beginning of the engine cycle.

The value of the indicated work for an individual cycle is best described by the electric energy generated in the range, which is delayed 400 to 500°CA regarding the engine cycle



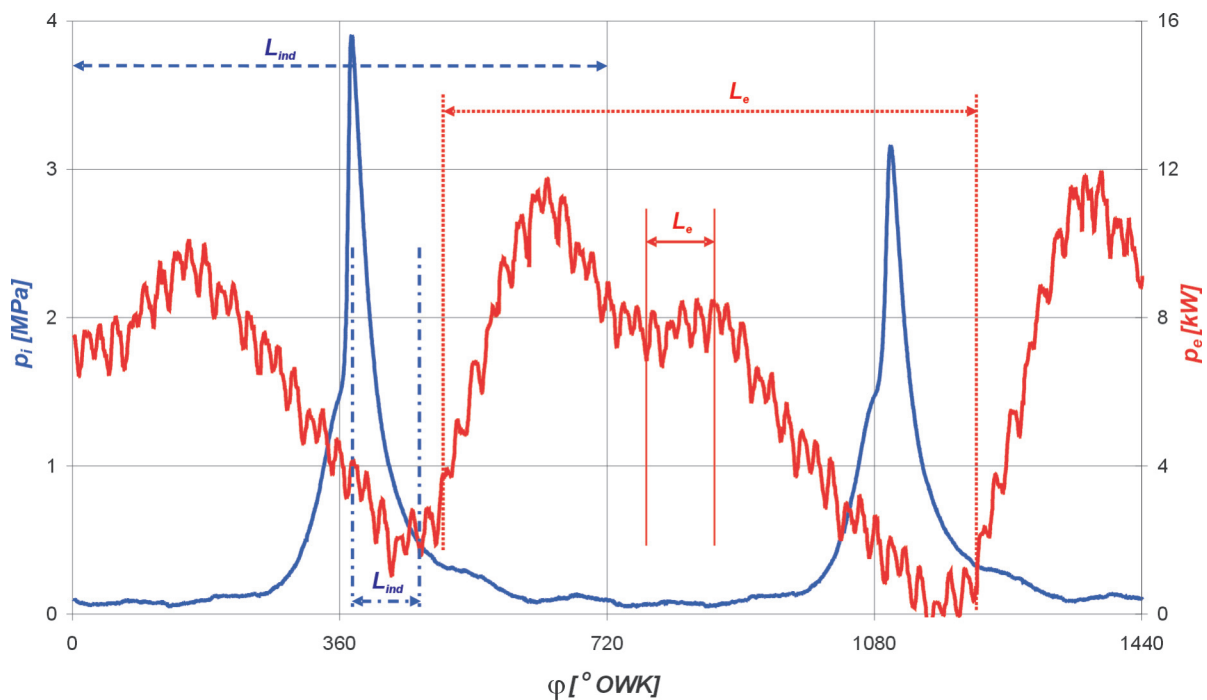
Rys. 6. Korelacja między pracą indykowaną (L_{ind}) obliczoną w przedziale od 378 do 468°OWK i energią elektryczną (L_e) wytworzoną w przedziale od 777 do 867°OWK

Fig. 6. The correlation between the indicated work calculated in the range of 378 to 468°CA and the electric energy generated in the range of 777 to 867°CA



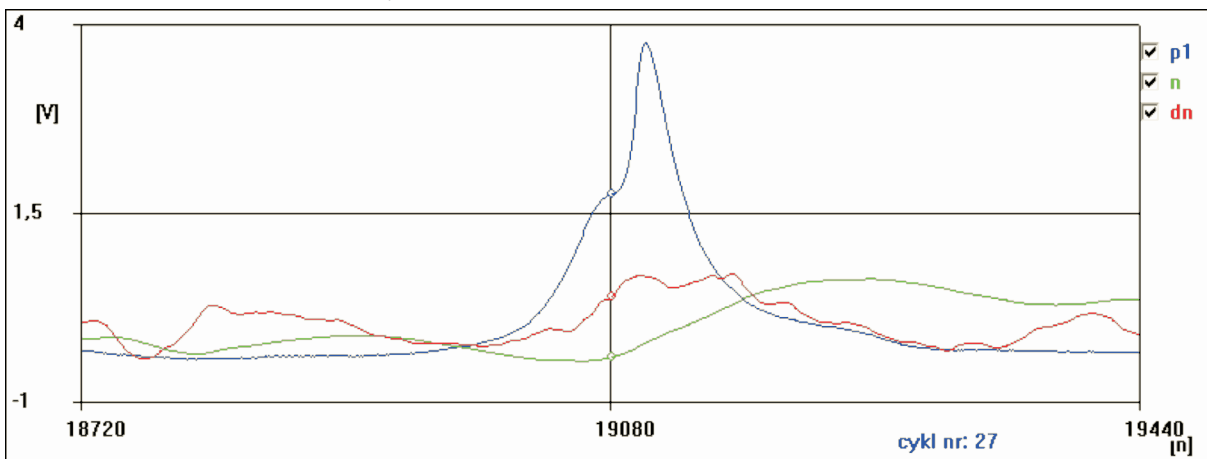
Rys. 7. Korelacja między pracą indykowaną cyklu (L_{ind}) i energią elektryczną (L_e) wytworzoną w przedziale od 780 do 870°OWK

Fig. 7. The correlation between the indicated work and the electric energy generated in the range of 780 to 870°CA



Rys. 8. Przebiegi ciśnienia w cylindrze (p_i) i mocy chwilowej (P_e) oraz przedziały kątowe obliczania pracy indykowanej L_{ind} i energii elektrycznej L_e , dla których korelacja między nimi ma największą wartość

Fig. 8. The cylinder pressure and the electric power courses with the angle intervals of the indicated work L_{ind} and the electric energy L_e the calculation with the maximum mutual correlation



Rys. 9. Przebiegi ciśnienia w cylindrze (p_i) oraz prędkości chwilowej (n) i przyspieszenia kątownego wału silnika (dn)

Fig. 9. Cylinder pressure (p_i), rotational speed (n) and crankshaft angular acceleration (dn) courses

przypadku 90 stopniowy zakres kątów, dla których obliczono energię elektryczną był przesunięty o 780°OWK względem początku cyklu silnikowego.

Jeśli porównamy ze sobą na wspólnym wykresie przedziały katowe odpowiadające największym wartościom korelacji między pracą indykowaną i energią elektryczną (rys. 8), to zauważymy, że w przypadku badanego silnika jednocylindrowego wartość pracy indykowanej dla pojedynczego cyklu najlepiej charakteryzuje wartość energii elektrycznej wytworzonej w przedziale katowym, który jest opóźniony w fazie od 400° do 500°OWK w stosunku do cyklu silnika.

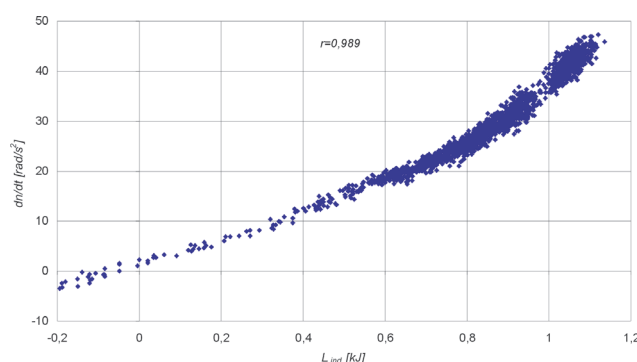
5. Korelacja pracy indykowanej z przyspieszeniem kątowym wału korbowego

Przyspieszenie katowe wału silnika spalinowego było kolejną wielkością, której został zbadany stopień korelacji z pracą indykowaną poszczególnych cykli. Zastosowanie bezpośredniego różniczkowania numerycznego zarejestrowanej prędkości chwilowej powoduje znaczne oscylacje przebiegu obliczonego przyspieszenia. Dlatego przed różniczkowaniem zastosowano cyfrowe wygładzenie wielomianowe (*DISPO Digital Smoothing Polynomial* [13]) przebiegu prędkości obrotowej. Rysunek 9 ilustruje przykładowe przebiegi ciśnienia w cylindrze oraz prędkości chwilowej i przyspieszenia katowego wału silnika. Przeprowadzone poszukiwania chwilowego przyspieszenia katowego wału silnika, które najlepiej koreluje z pracą indykowaną cyklu wykazały, że jest to wartość przyspieszenia jaką wał osiąga w okolicach 415°OWK każdego cyklu. Jednak z uwagi na zmienność położenia lokalnego maksimum przyspieszenia w okolicach tego punktu, osiągnięty stopień zgodności nie jest największy. Poprawę korelacji aż do poziomu $r = 0,989$

w przypadku badanego silnika jednocylindrowego w przypadku, na którym porównano, na jednym wykresie, zakresy odpowiadające najwyższym wartościom korelacji między pracą indykowaną a energią elektryczną (rys. 8).

5. The correlation between the indicated work and the crankshaft angular acceleration

The next quantity, whose correlation with the individual indicated work cycles was examined was the combustion engine crankshaft angular acceleration. The numerical direct differentiation of the registered instantaneous speed causes significant oscillations of the calculated acceleration course. That is why the Digital Smoothing Polynomial (*DISPO*) was applied before the rotational speed differentiation [13]. Fig. 9 illustrates the exemplary cylinder pressure, crank-



Rys. 10. Korelacja między pracą indykowaną cyklu (L_{ind}) i średnim przyspieszeniem kątowym wału korbowego (dn/dt) w przedziale od 407 do 422°OWK

Fig. 10. Correlation between indicated work (L_{ind}) and crankshaft mean angular acceleration (dn/dt) in interval at 407 to 422°CA

Tabela 1. Poziomy korelacji między badanymi wielkościami

Table 1. Levels of correlation between examined quantities

Nr rys. / Fig. No.	Korelowane wielkości / Examined quantities	Współczynnik korelacji / Correlation factor	Prawdopodobieństwo istnienia korelacji / Correlation probability [11]
2	praca indykowana cyklu - natężenie prądu 266° po GMP / indicated work - electric current 266 CA after TDC	0,878	> 99,9%
4	praca indykowana cyklu - energia elektryczna cyklu / indicated work - electric energy	0,756	> 99,9%
5	praca indykowana cyklu - energia elektryczna cyklu opóźniona o 500° / indicated work - electric energy shifted 500°	0,976	> 99,9%
6	praca indykowana w oknie 90° - energia elektryczna w oknie 90° opóźnionym o 399° / indicated work in 90° window - electric energy in 90° window shifted 399°	0,916	> 99,9%
7	praca indykowana cyklu - energia elektryczna w oknie 90° opóźnionym o 780° / indicated work in 90° window - electric energy in 90° window shifted 780°	0,923	> 99,9%
10	praca indykowana cyklu - średnie przyspieszenie katowe wału korbowego w przedziale od 407° do 422°OWK / indicated work in 90° window - crankshaft mean angular acceleration in the range of 407 to 422 CA	0,989	> 99,9%

osiągnięto zastępując przyspieszenie chwilowe przyspieszeniem średnim z zakresu 15°OWK. Wyniki te ilustruje rysunek 10.

6. Wnioski

Z przeprowadzonych wstępnych badań wynika, że w przypadku zespołu prądotwórczego napędzanego jednocylindrowym silnikiem istnieją bardzo wyraźne związki korelacyjne między zmiennością pracy indykowanej silnika spalinyowego a zmiennością parametrów generowanego prądu elektrycznego oraz zmiennością chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego. Wykonane badania pozwoliły na wstępny wybór najlepszej metody osiągnięcia wysokiej korelacji między pracą indykowaną silnika spalinyowego a prędkością i chwilową prędkością obrotową wału korbowego.

Publikacja została wykonana w ramach pracy badawczej Nr 4 T12D 031 28 finansowanej przez Komitet Badań Naukowych w Polsce / *This work was sponsored by the Polish State Committee for Scientific Research (Grant No. 4 T12D 031 28).*

Artykuł recenzowany

Skróty i oznaczenia / Abbreviations and Nomenclature

IMEP COV współczynnik kowariancji wartości średniego ciśnienia indykowanego / *value of the covariance factor of indicated work mean value*

p_i / IMEP średnie ciśnienie indykowane / *Indicated Mean Effective Pressure*

Literatura/Bibliography

- [1] Azzoni P.M., Minelli G., Moro D., Flora R., Serra G.: Indicated and load torque estimation using crankshaft angular velocity measurement. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Report 1999-01-0543, 1999.
- [2] Cupiał K., Dużyński A., Gruca M., Grzelka J.: Some Errors of Gas Engine Indication. Journal of KONES Internal Combustion Engines, Vol. 8 nr 1-2, 2001.
- [3] Cupiał K., Dużyński A., Grzelka J.: The Effect of Spark Discharge Variations on Gas Engine Cycle Parameters. Journal of KONES Internal Combustion Engines, vol. 8, nr 1-2, 2001.
- [4] Cupiał K., Katolik G.: An anomaly of combustion process in the biogas internal combustion engine with automatic control of discharge energy. Journal of KONES Internal Combustion Engines, 2001.
- [5] Geveci M., Osburn A. W., Franchek M. A.: An investigation of crankshaft oscillations for cylinder health diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 1107–1134.
- [6] Katolik G.: Zerowymiarowe, stochastyczne modele procesu spalania w silnikach z zapłonem iskrowym. Rozprawa doktorska, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, 2004.
- [7] Kociszewski A., Tutak W., Katolik G., Pyrc M.: Stanowisko badawcze do analizy związku pomiędzy fluktuacjami pracy indykowanej i prądu elektrycznego biogazowego zespołu prą-

dotwórczego. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa SILNIKI GAZOWE, Politechnika Częstochowska 2006.

- [8] Li Y., Gu F., Harris G., Ball A., Bennett N., Travis K.: The measurement of instantaneous angular speed. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 786–805.
- [9] Matekunas, F.: Modes and Measures of Cyclic Combustion Variability. SAE Paper 830337.
- [10] Rizzoni G.: Diagnosis of individual cylinder misfires by signature analysis of crankshaft speed fluctuations. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Report 890884.
- [11] Volk W.: Statystyka dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973.
- [12] Yang J., Wang L. Pu, Z., Yan Y.Z.X.: Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed. Mechanical Systems and Signal Processing 15 (2001) 549–564.
- [13] Ziegler H.: Applied Spectroscopy. Vol. 35, 88–92, 1981.

dotwórczego. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa SILNIKI GAZOWE, Politechnika Częstochowska 2006.

- [8] Li Y., Gu F., Harris G., Ball A., Bennett N., Travis K.: The measurement of instantaneous angular speed. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 786–805.
- [9] Matekunas, F.: Modes and Measures of Cyclic Combustion Variability. SAE Paper 830337.
- [10] Rizzoni G.: Diagnosis of individual cylinder misfires by signature analysis of crankshaft speed fluctuations. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Report 890884.
- [11] Volk W.: Statystyka dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973.
- [12] Yang J., Wang L. Pu, Z., Yan Y.Z.X.: Fault detection in a diesel engine by analysing the instantaneous angular speed. Mechanical Systems and Signal Processing 15 (2001) 549–564.
- [13] Ziegler H.: Applied Spectroscopy. Vol. 35, 88–92, 1981.

* Prof. zw. dr hab. inż. Karol Cupiał – profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Prof. Karol Cupiał, DSc, MEng – professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Information Technology of the Częstochowa University of Technology.



Dr inż. Michał Gruca – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Mr Michał Gruca, PhD, MEng – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science Częstochowa University of Technology.



Dr inż. Janusz Grzelka – adiunkt, kierownik Zakładu Pomiarów i Sterowania w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej.

Mr Janusz Grzelka, PhD, MEng – Head of Division of Machines Measurements and Control at the Częstochowa University of Technology.

