

Analiza wpływu parametrów eksploatacyjnych na drgania układu mikrogeneracyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania stanowiskowe układu mikrogeneracyjnego z silnikiem Stirlinga. Zaprezentowano wpływ takich parametrów eksploatacyjnych jak: prąd obciążenia, średnie ciśnienie gazu roboczego, zmianę napięcia na maszynie elektrycznej, którym towarzyszą przyspieszenia drgań korpusu układu mikrogeneracyjnego. Badania przeprowadzono dla gazu roboczego, którym był azot. Znaczna liczba powtórzeń pozwoliła na opis wyników badań w ujęciu statystycznym z użyciem takich miar jak: kurtoza, wskaźnik zmienności, współczynnik asymetrii a także funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Badania pozwalają stwierdzić czy przeprowadzony eksperyment jest powtarzalny oraz jak wybrane parametry eksploatacyjne wpływają na przyspieszenia drgań układu mikrogeneracyjnego

Abstract. The article presents a study on the micro-cogeneration test stand with a Stirling engine. It describes the influence of operating parameters such as load current, average working gas pressure and changes of the voltage of the electrical machine, which is accompanied by body vibration acceleration of the micro-cogeneration system. The study was conducted for the working gas, which was nitrogen. A significant number of repetitions allowed the description of the results of research in statistical terms using measures such as kurtosis, variability index, the skewness and the probability density function. The research allow to conclude whether an experiment is repeatable and how the selected operating parameters affect the acceleration of vibrations of the micro-cogeneration system. (**Analysis of influence of operational parameters on micro cogeneration system vibrations**).

Słowa kluczowe: Mikrogeneracja, silnik Stirlinga, badania eksploatacyjne, przyspieszenia drgań.

Keywords: Microcogeneration, Stirling engine, operational research, vibration acceleration.

Wstęp

Perspektywa wyczerpywalności zasobów paliw kopalnych otwiera nowe spojrzenie na funkcjonowanie zarówno Polskiego jak i Europejskiego rynku energii. Pakiet klimatyczny zobowiązuje członków Unii Europejskiej do zwiększenia: udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) na rynku energii (27% w perspektywie 2030 [1]), poprawy efektywności przetwarzania paliw pierwotnych (27% w perspektywie 2030) oraz ograniczenia emisji CO₂ (w perspektywie 2030 o 40% w odniesieniu do roku 1990) [1]. Należy podkreślić, że pakiet klimatyczny [2] jest bodźcem do rozwoju nowych technologii generacji rozproszonej [1-11]. Wśród technologii generacji rozproszonej wyróżnia się urządzenia, które wytwarzają energię z zasobów odnawialnych oraz urządzenia, które wykorzystują ciepło odpadowe do wytwarzania energii elektrycznej (urządzenia kogeneracyjne) [4, 8]. W kontekście poprawy efektywności energetycznej warto skupić się na urządzeniach kogeneracyjnych małej skali tzw. urządzeniach mikrogeneracyjnych [8], w których wielkość wytwarzanej energii elektrycznej wynosi do 50kW_e [5, 7]. Wśród tych urządzeń [4] znajduje się rozpatrywany w niniejszej pracy układ mikrogeneracyjny z silnikiem Stirlinga [12-26]. Z punktu widzenia użytkownika takiego układu niezwykle istotne są informacje o poprawnej jego eksploatacji (pozwalające na maksymalizację ich sprawności) oraz zapewnienie komfortu pracy układu (minimalizacja drgań i hałasu). W celu właściwego doboru parametrów eksploatacyjnych oprócz rejestracji informacji o warunkach pracy takich układów niezbędna jest także rejestracja i analiza przyspieszeń drgań, które towarzyszą pracy takich układów. Taka analiza pozwala na zbadanie wpływu wybranych parametrów pracy, m.in: ciśnienia, napięcia i prądu obciążenia maszyny elektrycznej, które istotnie wpływają na charakter pracy układu i towarzyszącym pracy układu przyspieszeniom drgań [27].

W pracy dokonano analizy powtarzalności uzyskanych wartości prądu, napięcia, przyspieszeń korpusu w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach a także ciśnienia w ujęciu statystycznym, z wykorzystaniem miar statystycznych (wartości średniej, odchylenia standardowego kurtozy, skośności oraz wskaźnika zmienności). Analizy przeprowadzono dla 0% oraz 93%

maksymalnej wartości obciążenia zadawanego w trakcie trwania eksperymentu.

Każde urządzenie techniczne cechuje pewna powtarzalność pracy, która wiąże się z uzyskiwaniem tych samych bądź też podobnych osiągnięć w trakcie takiego samego cyklu obciążeniowego. Na podstawie analizy eksploatacji obiektu technicznego można stwierdzić czy cechuje się on powtarzalnością pracy (uzyskania tych samych parametrów pracy, m.in: prędkości obrotowej przy mocy maksymalnej, sprawności [8,9-17, 24-26]).

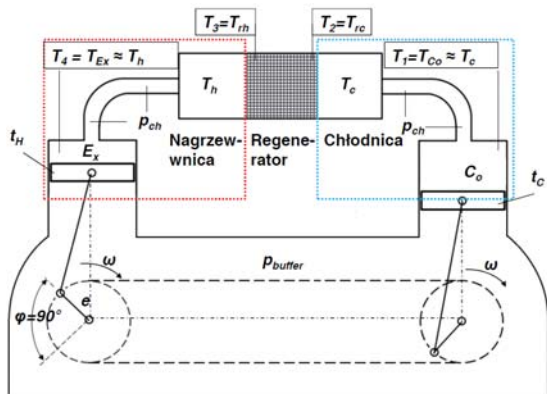
Należy podkreślić, że badania eksploatacyjne są niezwykle ważne np: z punktu widzenia określenia okresu gwarancji na dany produkt. Na podstawie długotrwałych badań eksploatacyjnych można określić zarówno żywotność jak również niezawodność pracy takiego układu w skutek zachodzących procesów zużyciowych elementów mechanicznych i ciernych.

W niniejszej pracy skupiono się na analizie i określeniu powtarzalności pracy układu mikrogeneracyjnego, która jest szczególnie istotna w rzeczywistych obiektach (m.in: prosumenckich gospodarstwach domowych oraz miejscach gdzie występuje odpadowy strumień ciepła wysokotemperaturowego). Podejście takie pozwala na wyeliminowanie błędów we wnioskowaniu wynikających z niepewności (losowego charakteru wyników badań np. wystąpienia wartości odstających w próbie lub zmiany wartości mierzonej wielkości fizycznej spowodowanej niekontrolowaną zmianą warunków pracy obiektu).

Opis stanowiska badawczego

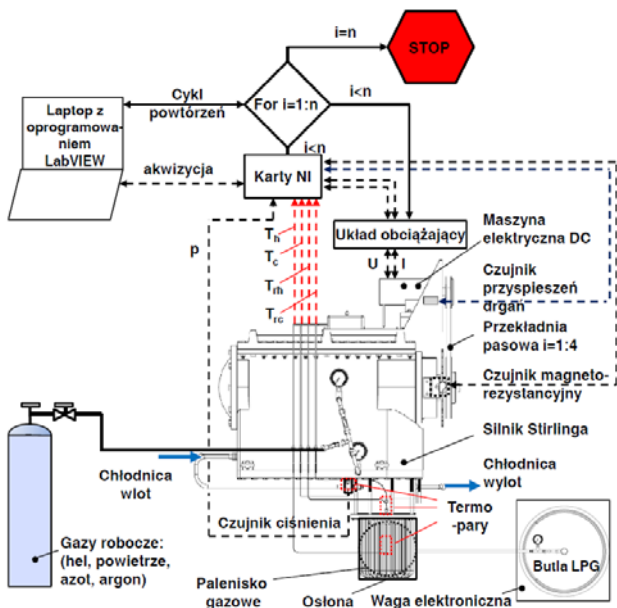
Stanowisko laboratoryjne na którym przeprowadzono badania, składało się z: silnika Stirlinga jednostronnego działania typu Alfa (Rys. 1), przekładni pasowej o przelozeniu i=1:4 pomiędzy silnikiem Stirlinga a silnikiem elektrycznym prądu stałego DC (moc znamionowa silnika elektrycznego 500 W), czujników pomiarowych (przetwornik ciśnienia umieszczony w cylindrze zimnym, czujnik magneto – indukcyjny, termopary pomiarowe typu K umieszczone w: przestrzeni sprężania T_{Co} , rozprężania T_{Ex} oraz na regeneratorsze od strony chłodnicy T_{rc} oraz od strony nagrzewnicy T_{rh}), układu obciążającego do 550 Watów (układ obciążający – pracował jako regulowane źródło prądowe), układu pomiarowego produkcji National

Instruments oraz oprogramowania napisanego w LabVIEW do rejestracji wybranych parametrów.



Rys. 1. Schemat poglądowy silnika Stirlinga typu alfa

Gaz roboczy, którym był azot dostarczano do przestrzeni buforowej p_{buffer} oraz przestrzeni roboczej p_{ch} z butli (Rys. 2) aż do uzyskania zadanej wartości ciśnienia $p=0.6\text{MPa}$. Podczas badań rejestrowane były równocześnie temperatury w przestrzeni sprężania T_{Co} (301K), rozprężania T_{Ex} (910K), temperatury na regeneratorze od strony zimnej T_{rc} oraz gorącej T_{rh} a także prędkość obrotowa silnika Stirlinga (która przeliczona została na prędkość obrotową maszyny elektrycznej przy znanym przełożeniu pomiędzy maszyną elektryczną a silnikiem Stirlinga), prąd zadawany na układ obciążający, napięcie na maszynie elektrycznej oraz ciśnienie w cylindrze zimnym (przestrzeń sprężania). Na rysunku 2 przedstawiono schemat budowy stanowiska.



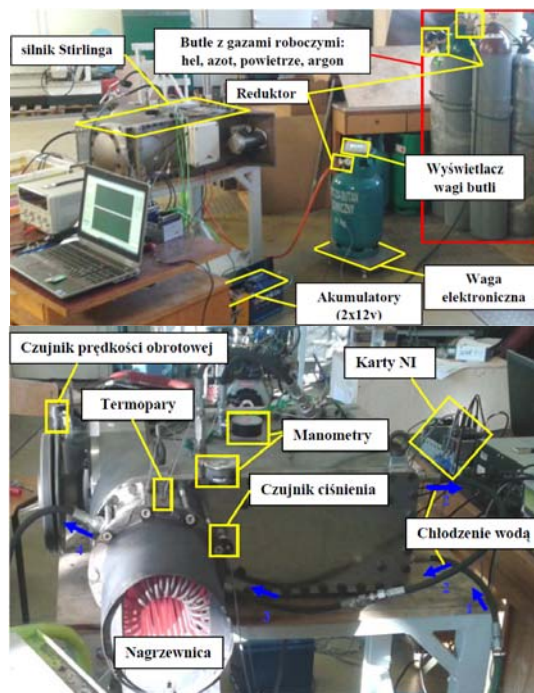
Rys.2. Schemat poglądowy stanowiska układu mikrokogeneracyjnego z silnikiem Stirlinga

Podczas pierwszej próby wyznaczono jakie maksymalne obciążenie prądowe można zadać na układ obciążający, by następnie określić skrajne wartości oraz krok z jakim układ będzie obciążany. Badania prowadzono dla 15 różnych wartości obciążeń. Na tej podstawie dalej wykonano badania powtarzalności pracy układu mikrokogeneracyjnego. Podczas badań wykonano zadaną liczbę 30 powtórzeń sesji pomiarowych (sesja oznacza badania dla kolejnych wartości obciążenia). Między

kolejnymi powtórzeniami występowały 10 sekundowe przerwy w celu przywrócenia układu do stanu biegu jałowego. Po wykonaniu zadanej liczby cykli uzyskane dane pomiarowe zostały zapisywane na dysk twardy komputera PC (rys. 2).

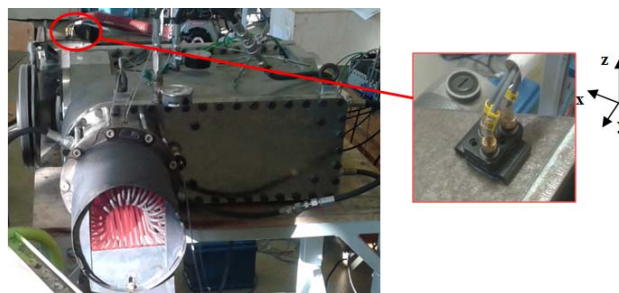
Czas rejestracji sygnałów dla każdego obciążenia wynosił 2 sekundy. W konsekwencji przeprowadzonego testu uzyskano po 30 przebiegów czasowych dla każdej wartości obciążenia. W celu statystycznego porównania poszczególnych powtórzeń oprócz przedstawienia i porównania funkcji gęstości prawdopodobieństw (po 30 dla każdego obciążenia) niezbędne było użycie miar statystycznych.

Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie stanowiska badawczego. Do rozruchu układu mikrokogeneracyjnego z silnikiem Stirlinga posłużyły 2 szeregowo połączone akumulatory kwasowo-ołowiowe 12 V (Forse 55Ah).



Rys.3. Stanowisko badawcze z silnikiem Stirlinga

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie stanowiska badawczego z trójosiowym czujnikiem przyspieszeń drgań, który zamontowano na jednej ze ścian bocznych (korpusie silnika Stirlinga).



Rys.4. Zdjęcie stanowiska wraz z trójosiowym czujnikiem przyspieszeń drgań (korpus)

Otrzymane podczas badań dane eksperymentalne poddane zostały analizie z wykorzystaniem miar statystycznych dla rejestrowanych parametrów, m.in: prądu oraz napięcia na maszynie elektrycznej, ciśnienia w przestrzeni sprężania, przyspieszenia w kierunkach x, y oraz z.

Badania eksploatacyjne - podstawy teoretyczne analiz

Analizy dotyczyły okresu normalnej eksploatacji [28, 29] obiektu jakim jest układ mikrogeneracyjny z silnikiem Stirlinga. Wykonując analizy wybranych zestawów danych skupiono uwagę na kilku cechach charakterystycznych danych prób, do których zaliczamy momenty zwykłe i centralne [30]. W niniejszym artykule analizowane były miary wykorzystujące momenty centralne M_k rzędu k prób $x_1...x_k$, które nazywane są średnimi potęg odchylenia wartości x_i od średniej arytmetycznej μ :

$$(1) \quad M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^k$$

gdzie: n - liczebność całej próby,
 μ - średnia arytmetyczna opisana zależnością:

$$(2) \quad \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

gdzie: n_i - liczebność danej i -tej próby.

Kolejną istotną cechą danej próby jest współczynnik asymetrii S . Jest on trzecim momentem centralnym ($k=3$ w wyrażeniu 1) podzielonym przez odchylenie standardowe podniesione do trzeciej potęgi. Współczynnik asymetrii S mówi o asymetrii obserwowanych wyników, można go zapisać w postaci:

$$(3) \quad S = \frac{M_3}{\sigma^3}$$

Gdy:

$S=0$ - to rozkład jest symetryczny,
 $S>0$ -prawostronna asymetria,
 $S<0$ - lewostronna asymetria.

Następną miarą opisującą daną próbę jest Kurtzoza (K). Mówi ona o spłaszczeniu rozkładu wokół wartości średniej. Kurtzoza jest to różnica ilorazu momentu czwartego rzędu i trzeciej potęgi odchylenia standardowego pomniejszona o trzy. Kurtozę możemy zapisać w postaci:

$$(4) \quad K = \frac{M_4}{\sigma^4} - 3$$

Jeżeli:

$K=0$ - spłaszczenie podobne jak w rozkładzie normalnym (Gaussa),
 $K>0$ - rozkład bardziej skoncentrowany niż normalny,
 $K<0$ - rozkład mniej skoncentrowany niż normalny

Wskaźnik zmienności (WZ) to iloraz między odchyleniem standardowym σ a wartością średnią, co można zapisać:

Wskaźnik zmienności (WZ) to iloraz między odchyleniem standardowym σ a wartością średnią, co można zapisać:

$$(5) \quad WZ = \frac{\sigma}{\eta}$$

gdzie: σ - odchylenie standardowe (pierwiastek z drugiego momentu centralnego), które możemy zapisać w postaci:

$$(6) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

Dodatkowo dla lepszego zobrazowania analizowanych danych w ujęciu statystycznym przedstawiono również doświadczalne funkcje gęstości prawdopodobieństwa, która mówi o prawdopodobieństwie wystąpienia zmiennej losowej

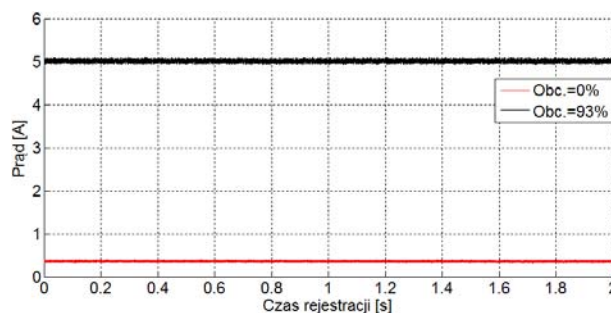
[30]. Im wyższa wartość tej funkcji tym większa jest koncentracja danych pomiarowych i niższy rozrzut (odchylenie standardowe).

Wyniki badań stanowiskowych oraz analiz

Otrzymane dane poddane zostały analizie z wykorzystaniem miar statystycznych opisanych w kolejnym rozdziale dla rejestrowanych parametrów, m.in: prądu, napięcia, ciśnienia, przyspieszenia drgań w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Ze względu na dużą liczbę zadawanych obciążeń i powtórzeń dla każdego obciążenia prezentację wyników przeprowadzonych analiz ograniczono do dwóch obciążeń układu mikrogeneracyjnego (0% oraz 93% obciążenia maksymalnego).

W dalszej części artykułu przedstawiono przebiegi czasowe rozpatrywanych wielkości (rys 5) miary statystyczne

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału prądowego dla obciążenia 0% oraz 93%. Odpowiadało to wartości prądu 0%-0.3A oraz 93%- 5A.



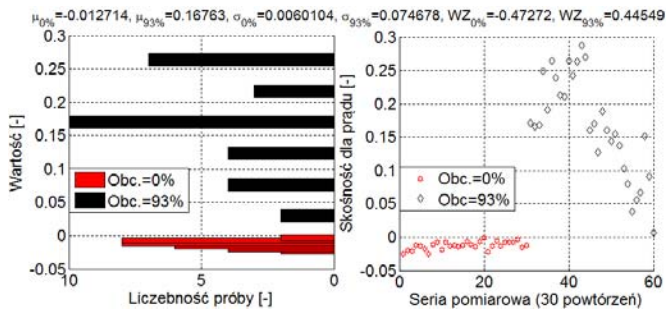
Rys.5. Przebieg sygnału prądowego dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunkach 6-8, 10-12, 14-16, 18-20, 22-24 oraz 26-28 przedstawiono zmianę takich miar statystycznych jak: kurtzoza, skośność oraz funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla m.in: prądu (skośność - rys. 6, kurtzoza- rys. 7. oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 8), napięcia (skośność - rys. 10, kurtzoza- rys. 11 oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 12), przyspieszeń w kierunkach x (skośność - rys. 14, kurtzoza-rys. 15. oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 16), y (skośność - rys. 18, kurtzoza- rys. 19. oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 20), z (skośność - rys. 22, kurtzoza- rys. 23. oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 24) a także ciśnienia (skośność - rys. 26, kurtzoza- rys. 27. oraz funkcja gęstości prawdopodobieństwa - rys. 28). Po lewej stronie (rys. 6-7, 10-11, 14-15, 18-19, 22-23 oraz 26-27) dla łatwiejszej interpretacji wyników przedstawiono histogram, który obrazuje jak rozkładają się wartości analizowanych miar danych prób. Na każdym z wykresów (rys.6-7, 10-11, 14-15, 18-19, 22-23 oraz 26-27) przedstawiono dwie serie pomiarowe (każda 30 powtórzeń) dla obciążenia układu wynoszącego 0% i 93% obciążenia maksymalnego (w sumie 60 kolejnych powtórzeń).

Zarejestrowane wartości prądu różniły się wartościami średnimi co wynikało z zadawanej wartości obciążenia (Rys. 8).

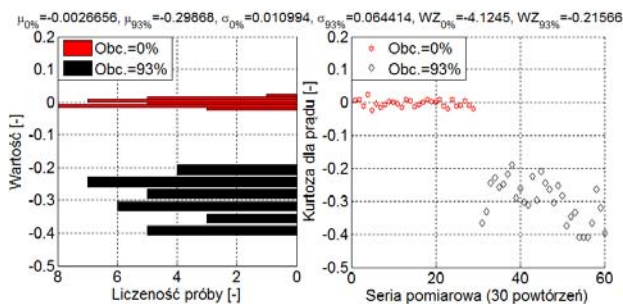
Na rysunku 6 przedstawiono wartości skośności dla prądu, analizując ten wykres można dostrzec, że wartości skośności są dla obciążenia 0% ujemne (lewostronna asymetria- $S<0$), natomiast dla obciążenia 93% występuje prawostronna asymetria ($S>0$). Wartość średnia skośności dla obciążenia 0% wynosi $\mu_{0\%}=-0.0127$, natomiast dla obciążenia 93% wynosi ona $\mu_{93\%}=0.1676$. Odchylenie standardowe skośności (rozrzut względem średniej) jest

większe dla obciążenia 93%, wynosi ono $\sigma_{93\%}=0.0746$, w przypadku obciążenia 0% układu mikrogeneracyjnego wyniosło blisko $\sigma_{0\%}=0.006$. Wskaźnik zmienności skośności ma wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniósł $WZ_{93\%}=0.4454$, natomiast dla obciążenia 0%, wyniósł $WZ_{0\%}=-0.4727$.



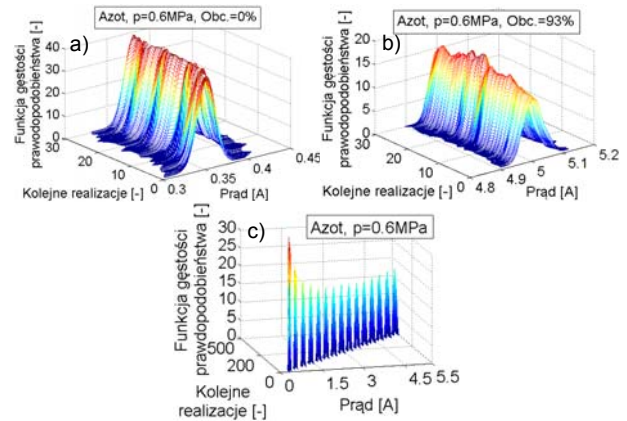
Rys.6. Wykresy skośności dla prądu wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Rysunek 7 przedstawia wykresy kurtozy dla prądu (przy obciążeniu 0% a także 93%). Przy obciążeniu 0% wartość średnia kurtozy wyniosła $\mu_{0\%}=-0.0026$, również dla obciążenia 93% była ujemna i wyniosła $\mu_{93\%}=-0.32$. Jak już wspomniano w rozdziale 3, wartość kurtozy <0 informuje, że rozkład jest mniej skoncentrowany niż normalny, co oznacza, że jest duży rozrzut danych. W przypadku kurtozy odchylenie standardowe dla obciążenia 0% wynosi $\sigma_{0\%}=0.0109$, dla obciążenia 93% także jest dodatnie i wynosi $\sigma_{93\%}=0.0644$. Warto podkreślić, że dla obciążenia 93% rozkład kurtozy jest mniej skoncentrowany niż w przypadku obciążenia 0%. Wynika to przede wszystkim z wyższych wartości amplitud prądów obciążenia. Współczynnik zmienności kurtozy dla obciążenia 0% wynosi $WZ_{0\%}=-4.1245$. Taka wartość wynika, z tego, że wartość średnia jest bardzo mała (dodatkowo w zależności (5) występuje w mianowniku). Dla obciążenia 93% współczynnik zmienności kurtozy wyniósł $WZ_{93\%}=-0.2156$.



Rys.7. Wykresy kurtozy dla prądu wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunku 8 przedstawiono funkcję gęstości prawdopodobieństwa prądu (rys. 8a - obciążenie 0%, rys. 8b- obciążenie 93% natomiast rys. 5c- zmiana wartości funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rosnących obciążeń). Na rysunku 8c pokazano wyniki dla większej liczby obciążeń (prądów), które na rysunku 8a oraz 8b rozpatrywano osobno (dla obciążenia 0% oraz 93%). Wyniki badań oraz analizy wykazują, że wraz ze wzrostem obciążenia (rys. 8a,b, c) układu zmniejsza się wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa, co oznacza, że prawdopodobieństwo wystąpienia wartości w pobliżu wartości modalnej maleje wraz ze wzrostem obciążenia (w konsekwencji występujące wartości prądu mają większy rozrzut- rysunek 8c).



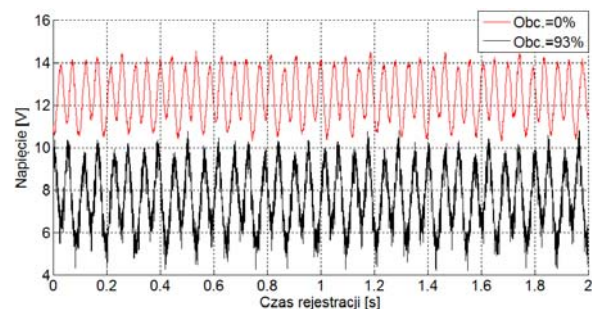
Rys.8. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa prądu dla obciążenia 0% a), 93% b) oraz przy różnych obciążeniach c) dla prądu

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału napięciowego na maszynie elektrycznej dla obciążenia 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego. Wraz ze wzrostem obciążenia układu obniżała się wartość napięcia na maszynie elektrycznej z 12.2V dla obciążenia 0% do 7,5V dla obciążenia 93%. Spadkowi napięcia podczas wzrostu obciążenia układu towarzyszył też spadek prędkości obrotowej.

Na podstawie badań określono, że współczynnik konwersji zmiany napięcia na zmiany prędkości obrotowej $k_v=100\text{obr/V}$, przy czym relację między zmianą napięcia i prędkości obrotowej określa zależność:

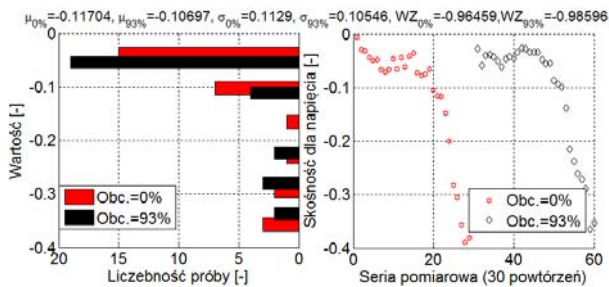
$$(7) \quad \Delta n = \Delta u k_v$$

gdzie: Δn - zmiana prędkości obrotowej maszyny elektrycznej [obr/min], Δu - zmiana napięcia na maszynie elektrycznej [V], k_v - współczynnik konwersji zmiany napięcia na zmianę prędkości obrotowej [obr/V].



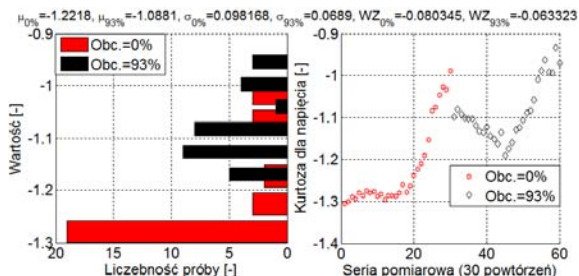
Rys.9. Przebieg sygnału napięciowego dla obciążenia 0% oraz 93%

Analizując wykresy skośności dla napięcia (rys. 10) można stwierdzić występującą asymetrię lewostronną prób (ujemne wartości). Wartość średnia skośności dla obciążenia 0% wynosi $\mu_{0\%}=-0.117$, natomiast dla obciążenia 93% wynosi $\mu_{93\%}=-0.1069$. Również odchylenie standardowe skośności (rozrzut wokół wartości średniej) ma wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniosło $\sigma_{93\%}=0.1054$ natomiast dla obciążenia 0% było wyższe i osiągnęło wartość $\sigma_{0\%}=0.1129$. Współczynnik zmienności skośności dla obciążenia 0% wyniósł $WZ_{0\%}=-0.9625$, w przypadku obciążenia 93% wniósł $WZ_{93\%}=-0.9859$.



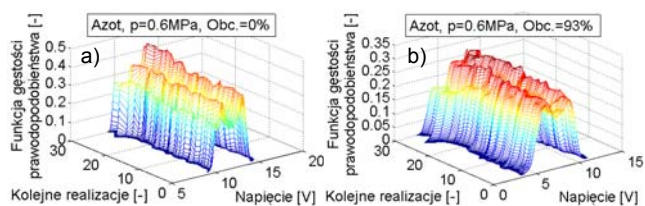
Rys.10. Wykresy skośności napięcia wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Rysunek 11 przedstawia wykresy kurtozy napięcia (przy obciążeniu 0% a także 93%). Dla obciążenia 0% wartość średnia wyniosła $\mu_{0\%} = -1.2218$ natomiast dla obciążenia 93% była równa $\mu_{93\%} = -1.0881$. Odchylenie standardowe dla obciążenia 0% wyniosło $\sigma_{0\%} = 0.0981$, natomiast w porównaniu do obciążenia 93% było niższe i było równe $\sigma_{93\%} = 0.0689$. Warto także podkreślić, że kurtosa ma wartość ujemną, co oznacza, że rozkład jest mniej skoncentrowany niż normalny. Współczynnik zmienności kurtozy dla obciążenia 0% był równy $WZ_{0\%} = -0.0803$, w przypadku obciążenia 93% wyniósł $WZ_{93\%} = -0.0633$.



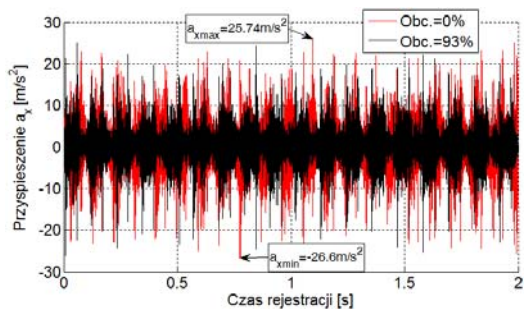
Rys.11. Wykresy kurtozy napięcia wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Przed analizą funkcji gęstości prawdopodobieństwa warto zwrócić uwagę na przebieg sygnału napięcia (rys. 9), który jest zbliżony do przebiegu sinusoidalnego. Taki charakter przebiegu powoduje, że rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa (rysunek 12a,b) jest wielomodalny. Warto także podkreślić, że wartość średnia występuje między wartościami modalnymi. Analogicznie jak w przypadku prądu, wzrost obciążenia powoduje większy rozrzut napięcia wokół wartości średniej.



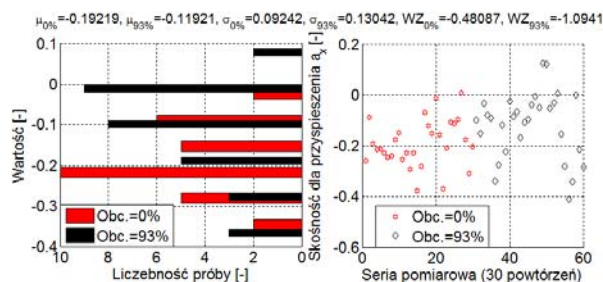
Rys.12. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa napięcia przy obciążeniu 0% a) oraz 93% b)

Na rysunku 13 przedstawiono przykładowe przebiegi przyspieszeń drgań w kierunku x (a_x [m/s²]) dla obciążenia 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego. Zgodnie z oczekiwaniami najwyższe wartości przyspieszeń występują w kierunku x, ma to związek z ruchem posuwisto-zwrotnym układu tłokowo-korbowego. Najwyższa wartość przyspieszeń występuje dla obciążenia 0%, dla przyspieszenia dodatniego wynosi $a_{x\max 0\%} = 25.74 \text{ m/s}^2$ (rys. 13) natomiast dla przyspieszenia ujemnego jest wyższa i wynosi $a_{x\min 0\%} = -26.6 \text{ m/s}^2$.



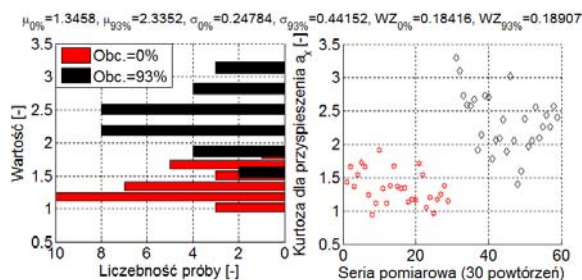
Rys.13. Przebieg sygnału przyspieszeń drgań korpusu w kierunku x dla obciążenia 0% oraz 93%

Biorąc pod uwagę skośność dla przyspieszenia w kierunku x (rys. 14), należy podkreślić, że występuje i przeważa asymetria lewostronna zarówno dla obciążenia 0% jak również 93%. Wartość średnia dla skośności dla obciążenia 0% wyniosła $\mu_{0\%} = -0.1921$, natomiast dla obciążenia 93% była równa $\mu_{93\%} = -0.1192$. Odchylenie standardowe skośności od wartości średniej miało wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniosło $\sigma_{93\%} = 0.1304$, w przypadku obciążenia 0% wyniosło $\sigma_{0\%} = 0.0924$. Współczynnik zmienności skośności osiągnął niższą wartość dla obciążenia 93%, był równy $WZ_{93\%} = -1.0941$, natomiast dla obciążenia 0% współczynnik zmienności wyniósł $WZ_{0\%} = -0.4808$.



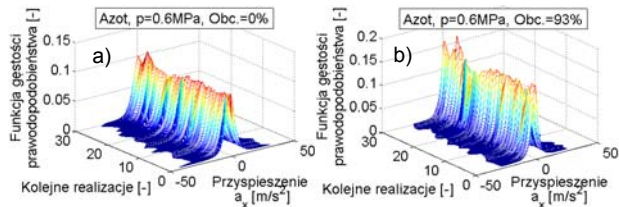
Rys.14. Wykresy skośności przyspieszenia w kierunku x wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Rysunek 15 przedstawia wykresy kurtozy dla przyspieszenia korpusu w kierunku x- równoległym do osi cylindrów [27]. Kurtosa ma wartości dodatnie, co oznacza, że rozkład jest bardziej skoncentrowany niż normalny. Przy obciążeniu 0% wartość średnia kurtozy była niższa i równa $\mu_{0\%} = 1.3458$, natomiast dla obciążenia 93% była wyższa i wyniosła $\mu_{93\%} = 2.3352$. Także odchylenie standardowe kurtozy dla obciążenia 93% było wyższe, wyniosło $\sigma_{93\%} = 0.4415$, natomiast dla obciążenia 0% wyniosło $\sigma_{0\%} = 0.2478$. Wskaźnik zmienności kurtozy osiągnął wyższą wartość dla obciążenia 93%, był równy $WZ_{93\%} = 0.189$, natomiast dla obciążenia 0% wyniósł $WZ_{0\%} = 0.1841$.



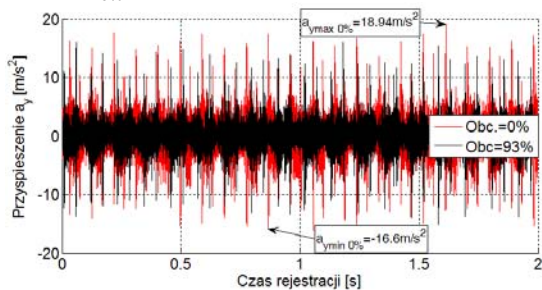
Rys.15. Wykresy kurtozy przyspieszenia w kierunku x wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunku 16 przedstawiono funkcję gęstości prawdopodobieństwa przyspieszeń korpusu w kierunku x (rysunek 16a- 0% obciążenie 16b - 93%). Wraz ze wzrostem obciążenia układu wzrastają przyspieszenia drgań w kierunku x. Wynikają one z ruchu postępowo-zwrotnego mechanizmu tłokowo-korbowego, który znajduje się w silniku Stirlinga. Wyższe wartości funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla obciążenia 93% wskazują, na mniejszą losowość drgań w kierunku x.



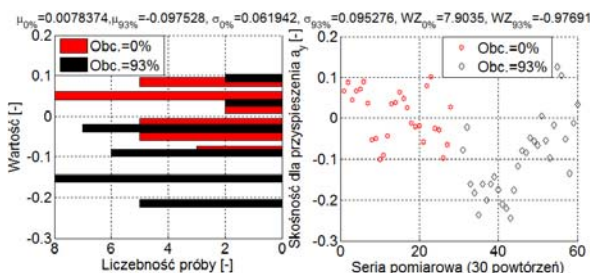
Rys.16. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa przyspieszenia w kierunku x dla obciążenia 0% a) oraz 93% b).

Na rysunku 17 przedstawiono zmianę przyspieszeń drgań w kierunku y (a_y [m/s²]) dla obciążenia 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego. Najwyższa wartość przyspieszeń drgań występowała dla obciążenia 0% (bieg jałowy), dla przyspieszenia dodatniego wartość maksymalna wyniosła $a_{x\max 0\%}=18.94\text{m/s}^2$ (rys. 17) natomiast dla przyspieszenia ujemnego była niższa i wyniosła $a_{x\min 0\%}=-16.6\text{m/s}^2$.



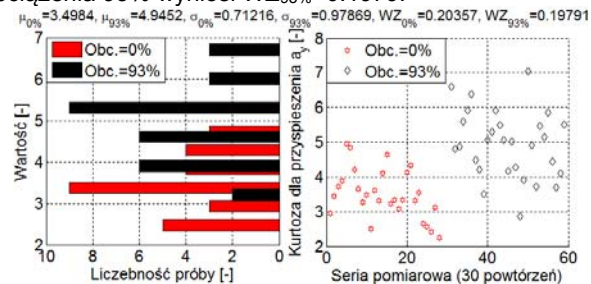
Rys.17. Wykresy sygnału przyspieszeń drgań korpusu w kierunku y dla obciążenia 0% oraz 93%

Analizując skośności dla przyspieszenia w kierunku y (rys. 18), można dostrzec, że dla obciążenia 0% występuje asymetria prawostronna natomiast dla obciążenia 93% przeważa asymetria lewostronna. Wartość średnia skośności dla obciążenia 0% wynosi $\mu_{0\%}=0.0078$, natomiast dla obciążenia 93% jest równa $\mu_{93\%}=-0.0975$. Odchylenie standardowe dla skośności ma wyższą wartość przy obciążeniu 93%, wynosi ono $\sigma_{93\%}=0.0952$, natomiast dla obciążenia 0% było równe $\sigma_{0\%}=0.0619$. Współczynnik zmienności dla obciążenia 0% wyniósł $WZ_{0\%}=7.9035$, natomiast dla obciążenia 93% współczynnik zmienności był równy $WZ_{93\%}=-0.9769$.



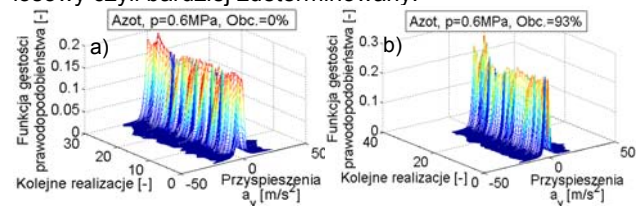
Rys.18. Wykresy skośności przyspieszenia w kierunku y wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Rysunek 19 przedstawia wykresy kurtozy dla przyspieszenia korpusu w kierunku y. Kurtoza ma wartości dodatnie, co oznacza, że rozkład jest bardziej skoncentrowany niż rozkład normalny. Wartość średnia dla kurtozy przyspieszenia w kierunku y jest wyższa przy obciążeniu 93%, wyniosła $\mu_{93\%}=4.9452$, natomiast przy obciążeniu 0% była równa $\mu_{0\%}=3.4984$. Także odchylenie standardowe od wartości średniej miało wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniosło ono $\sigma_{93\%}=0.9786$, natomiast dla obciążenia 0% było ono niższe, wyniosło $\sigma_{0\%}=0.7121$. Współczynnik zmienności kurtozy posiadał wyższą wartość dla obciążenia 0%, wyniósł $WZ_{0\%}=0.2035$, natomiast dla obciążenia 93% wyniósł $WZ_{93\%}=0.1979$.



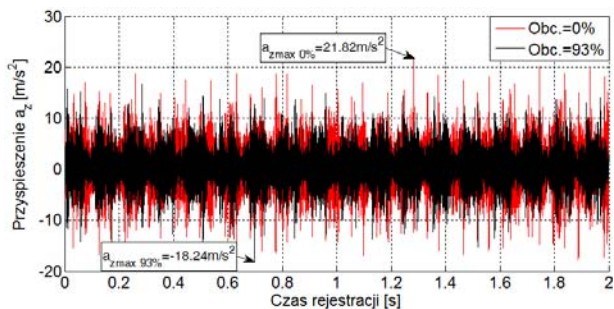
Rys.19. Wykresy kurtozy przyspieszenia w kierunku y wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunku 20 przedstawiono funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla przyspieszeń korpusu w kierunku y - równoległym do osi wału (rysunek 20a- 0% obciążenie 20b -93% obciążenie). Drgania w kierunku y wynikają głównie z nierównomierności pracy silnika Stirlinga (ponieważ jest to układ dwucylindrowy typu Alfa jednostronnego działania). Należy podkreślić, że wyższa wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla obciążenia 93% (rys. 20b) informuje o wyższym prawdopodobieństwie wystąpienia drgań w kierunku y o wartościach zbliżonych do wartości modalnej, wyższa jest także powtarzalność pracy układu (nierównomierność pracy układu wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia - stwierdzono na podstawie obserwacji własnych podczas prowadzenia badań). Należy także podkreślić, że powtarzalność jest zawsze większa gdy rozkłady się nie zmieniają, w przypadku gdy jest mniejszy rozrzut to rozkład jest mniej losowy czyli bardziej zdeterminowany.



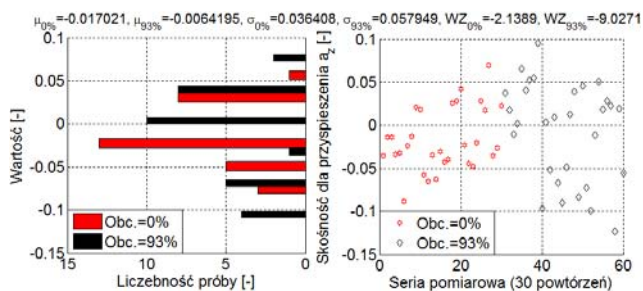
Rys.20. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa przyspieszeń w kierunku y dla obciążenia 0% a) oraz 93% b).

Na rysunku 21 przedstawiono zmianę przyspieszeń drgań w kierunku z (a_z [m/s²]) dla obciążenia 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego. Najwyższa wartość przyspieszeń drgań występowała dla dodatniego obciążenia 0% (bieg jałowy), wartość maksymalna wyniosła $a_{x\max 0\%}=21.82\text{m/s}^2$ (rys. 21) natomiast dla przyspieszenia najniższa wartość była przy obciążeniu 93% i wyniosła $a_{x\min 0\%}=-18.24\text{m/s}^2$.



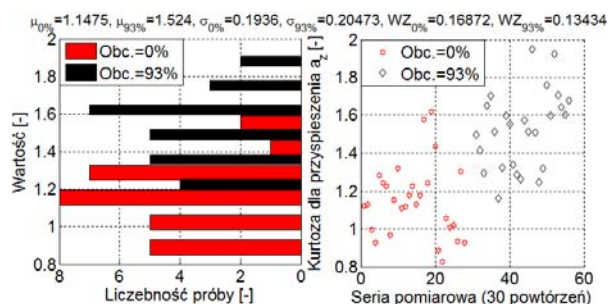
Rys.21. Przebieg sygnału przyspieszeń drgań korpusu w kierunku z dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunku 22 zaprezentowano wykresy skośności dla przyspieszenia w kierunku z. Analizując otrzymane zbiory danych można dostrzec, że dominuje asymetria lewostronna zarówno dla obciążenia 0% jak i 93%. Wartość średnia skośności dla obciążenia 0% wyniosła $\mu_{0\%} = -0.017$, natomiast dla obciążenia 93% wartość średnia wyniosła $\mu_{93\%} = -0.0064$. Warto także zwrócić uwagę na odchylenie standardowe, które posiada w przypadku obciążenia 93% ma wyższą wartość, $\sigma_{93\%} = 0.0579$ niż odchylenie standardowe dla obciążenia 0%, które wyniosło $\sigma_{0\%} = 0.0364$. Wskaźnik zmienności dla obciążenia 0% był równy $WZ_{0\%} = -2.1389$, natomiast w przypadku obciążenia 93% wynosił $WZ_{93\%} = -9.0271$ (był ponad czterokrotnie wyższy niż dla obciążenia 0%).



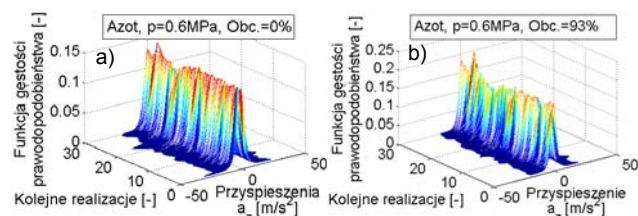
Rys.22. Wykresy skośności przyspieszenia w kierunku z wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Na rysunku 23 zostały przedstawione wykresy kurtozy dla przyspieszenia korpusu w kierunku z. Kurtoza miała wartości dodatnie, co oznacza, że rozkład był bardziej skoncentrowany niż normalny. Wartość średnia dla kurtozy przy obciążeniu 0% wyniosła, $\mu_{0\%} = 1.1475$, natomiast dla obciążenia 93% wyniosła $\mu_{93\%} = 1.524$. Odchylenie standardowe kurtozy miało wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniosło $\sigma_{93\%} = 0.2047$, natomiast w przypadku obciążenia 0% było ono niższe, równe $\sigma_{0\%} = 0.1936$. Wskaźnik zmienności był wyższy dla obciążenia 0%, wyniósł $WZ_{93\%} = 0.1687$, dla obciążenia 93% wyniósł $WZ_{93\%} = 0.1343$.



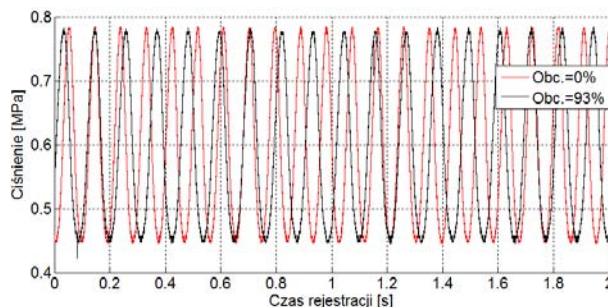
Rys.23. Wykresy kurtozy przyspieszenia w kierunku z wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%.

Na rysunku 24 przedstawiono wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przyspieszenia korpusu w kierunku z prostym do płaszczyzny osi cylindrów (rysunek 24a- 0% obciążenie 24b -93% obciążenie), podobnie jak w przypadku pozostałych dwóch wcześniej rozważanych kierunków drgań wraz ze wzrostem obciążenia układu (z 0%- rys.16a- dla przyspieszenia w kierunku x oraz 20a- dla przyspieszenia w kierunku y na 93% obciążenia -rys. 16b oraz 20b) wzrasta wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa, Przyspieszenia drgań w żadnym kierunku nie przekraczają 3g (blisko 30m/s²) (rys. 13, 17 a także 21).

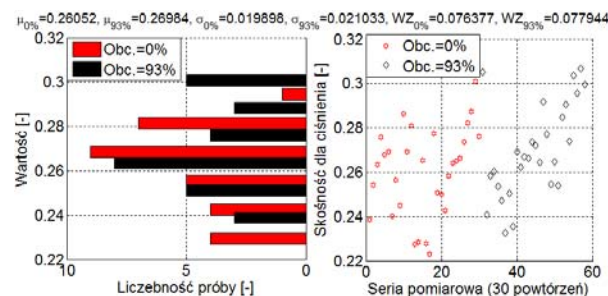


Rys.24. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa amplitudy przyspieszeń w kierunku z dla obciążenia 0% a) oraz 93% b).

Rysunek 25 przedstawia przebieg sygnału ciśnienia mierzonego w przestrzeni sprężania dla gazu roboczego, którym był azot przy obciążeniu 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego. Charakter zmian ciśnienia w przestrzeni sprężania jest zbliżony do sinusoidalnego. Wraz ze wzrostem obciążenia układu z 0% na 93% towarzyszącej zmianie prędkości obrotowej towarzyszy zmiana, wydłużenie okresu cyklu roboczego. Dla obciążenia 0% okres cyklu roboczego wyniósł 0.093s ($f=10.75\text{Hz}$), natomiast dla obciążenia 93% okres cyklu roboczego wyniósł 0.11s ($f=8.75\text{Hz}$).



Rys.25. Przebieg sygnału ciśnienia mierzonego w przestrzeni sprężania dla gazu roboczego, którym był azot przy obciążeniu 0% oraz 93% obciążenia maksymalnego

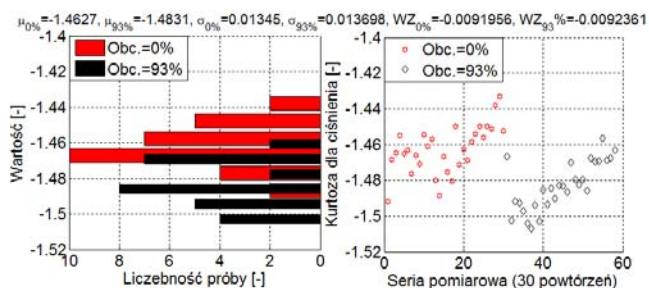


Rys.26. Wykresy skośności dla ciśnienia w przestrzeni sprężania wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Analizując wartości skośności dla ciśnienia (rys. 26b) można dostrzec, że występuje asymetria prawostronna zarówno dla obciążenia 0% jak i 93%. Wartość średnia skośności dla obciążenia 0% wyniosła $\mu_{0\%} = 0.2605$,

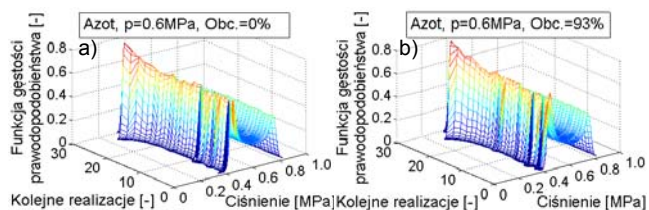
natomiast dla obciążenia 93% wartość średnia wyniosła $\mu_{93\%}=0.2698$. Odchylenie standardowe dla obciążenia 93% było równe $\sigma_{93\%}=0.021$, natomiast dla obciążenia 0% wyniosło $\sigma_{0\%}=0.0198$. Wskaźnik zmienności dla obciążenia 0% był równy $WZ_{0\%}=0.0763$, natomiast dla obciążenia 93% wyniósł $WZ_{93\%}=0.0779$.

Na rysunku 27 przedstawiono wykresy kurtozy dla ciśnienia mierzonego w przestrzeni sprężania. Kurtoza miała wartości ujemne, co oznaczało, że rozkład jest mniej skoncentrowany niż normalny. Wartość średnia kurtozy przy obciążeniu 0% wyniosła $\mu_{0\%}=-1.4627$, natomiast dla obciążenia 93% układu była równa $\mu_{93\%}=-1.4831$. Odchylenie standardowe miało wyższą wartość dla obciążenia 93%, wyniosło $\sigma_{93\%}=0.0136$, natomiast dla obciążenia 0% było równe $\sigma_{0\%}=0.0134$. Wskaźnik zmienności dla obciążenia 0% wyniósł $WZ_{0\%}=0.0091$, natomiast dla obciążenia 93% wyniósł $WZ_{93\%}=-0.0092$.



Rys.27. Wykresy kurtozy dla ciśnienia mierzonego w przestrzeni sprężania wraz z histogramami dla obciążenia 0% oraz 93%

Rysunek 28 przedstawia wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla ciśnienia mierzonego przestrzeń sprężania. Podobnie jak w przypadku napięcia (rys. 12) także rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla ciśnienia jest wielomodalny, wynika z faktu, że przebieg ciśnienia jest zbliżony do sinusoidalnego. Dla obciążenia 0% wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa (rys.28a) wyniosła 0.799. Wyższa wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa wynosząca 0.841 dla obciążenia 93% (rys. 28b) informuje o większej powtarzalności pracy układu. W praktyce wynika to z faktu, że układ pracuje z tym samym stopniem sprężania i powtarzalnym charakterem zmian zachodzącego zjawiska podczas cyklu roboczego [2-6]. Można to także interpretować jako wzrost pola pracy i zmianę kształtu wykresu indykatorowego zamkniętego we współrzędnych ciśnienie - objętość właściwa (p-v).



Rys.28. Wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla obciążenia 0% a) oraz 93% b) dla ciśnienia w przestrzeni sprężania

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawione zostały badania eksploatacyjne układu mikrokogeneracyjnego z silnikiem Stirlinga. Analizę jakościową otrzymanych rezultatów przeprowadzono przy użyciu najczęściej wykorzystywanych miar statystycznych, m.in: skośności, kurtozy oraz ich średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego oraz wskaźnika zmienności, który mówił jak zmienia się odchylenie standardowe względem wartości średniej. Badania przeprowadzono dla 30 serii pomiarowych przy danym obciążeniu.

Użycie opisywanych miar umożliwiło interpretację powtarzalności wyników pomiarów dla przeprowadzonych serii pomiarowych. W celu zobrazowania prawdopodobieństwa wystąpienia określonych wartości, m.in: prądu, napięcia, przyspieszeń drgań korpusu w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, ciśnienia (mierzonego w przestrzeni sprężania) w zadanym przedziale zmienności wykorzystano funkcję gęstości prawdopodobieństwa. W przypadku sygnałów okresowych, zbliżonych do sinusoidalnych, rozkłady miały charakter wielomodalny (koncentracja ujemna oraz dodatnia wartości). Podkreślić należy także fakt, że wraz ze wzrostem obciążenia układu wzrastały wartości funkcji gęstości prawdopodobieństwa przyspieszeń drgań korpusu we wszystkich kierunkach, w tym także dla ciśnienia, natomiast dla pozostałych analizowanych parametrów, m.in: prądu i napięcia wartości te były niższe (występowało większe odchylenie od wartości średniej, szerszy przedział zmienności). Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analiz można stwierdzić, że uzyskane wyniki są powtarzalne.

Niezwykle istotne poznawczo jest również dostrzeżenie, że wraz ze wzrostem obciążenia układu z 0% (bieg jałowy) na 93% obciążenia maksymalnego wartości przyspieszeń drgań we wszystkich kierunkach mają niższe wartości niż na biegu jałowym. Wynika to z wydłużenia okresu cyklu roboczego, któremu towarzyszy spadek prędkości obrotowej wału korbowego (zmniejszenie także napięcia na maszynie elektrycznej). Szczegółowy opis cyklu roboczego omówiono w [14, 21], ze szczególnym uwzględnieniem przetłaczania gazu przez wymienniki ciepła [21]. Warto również zwrócić uwagę, że funkcje gęstości prawdopodobieństwa także osiągają wyższe wartości niż na biegu jałowym, świadczy to o większej powtarzalności i przewidywalności pracy takiego układu. Należy również podkreślić, że eksploatacja układu mikrokogeneracyjnego przy obciążeniu 93% wydłuża się proces wymiany ciepła w skutek zmniejszenia prędkości obrotowej i wydłużenia okresu pojedynczego cyklu roboczego.

W żadnym kierunku przyspieszenia drgań nie przekroczyły 3g, nie mniej jednak na uwagę zasługuje fakt, że najwyższe wartości drgań występowały w kierunku równoległym do osi cylindrów w kierunku x, drgania pochodziły od ruchu postępowo zwrotnego układu tłokowo-korbowego. Należy dodać, że najwyższe wartości przyspieszeń drgań występowały przy skrajnych położeniach tłoków gdzie następował proces przetłaczania gazu roboczego pomiędzy wymiennikami ciepła, szczegółowo opisany w [14].

Autorzy: dr hab. inż. Jędrzej Mączak, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: jma@mechatronika.net.pl, dr inż. Szymon Gontarz, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: rgumin@simr.pw.edu.pl, dr inż. Robert Gumiński, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: Szymon.Gontarz@simr.pw.edu.pl, mgr inż. Adrian Chmielewski, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: a.chmielewski@mechatronika.net.pl, mgr inż. Przemysław Szulim, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, E-mail: p.szulim@mechatronika.net.pl.

LITERATURA

- [1] EUCO 169/14 Conclusions – 23/24 October 2014 {<http://www.consilium.europa.eu/> –accessed 25.08.2015}

- [2] Directive 2009/28/EC of the council of 23 april 2009, on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [3] Chmielewski A., Radkowski S., Rozwój odnawialnych źródeł energii na terenie Polski – wyzwania i problemy (The development of renewable energy sources in Poland – challenges and problems). *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 99 (2014), nr.3, 25–34 [In Polish]
- [4] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC
- [5] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC
- [6] Chmielewski A., Radkowski S., Prosumer on the energy market: case study. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Proceedings of the Institute of Vehicles*, 102 (2015), nr. 2, 23–29
- [7] Bolük G., Mert M., Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries, *Energy*, 74 (2014), 439–446
- [8] Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S., Szulim P., Aspekty wsparcia i rozwoju mikrokogeneracji rozproszonej na terenie Polski, *Rynek Energii*, 114 (2014), nr.5, 94–101 [In Polish]
- [9] Szablowski Ł., Milewski J., Badyda K., Cooperation of energy sources in distributed generation, *Rynek Energii*, 118 (2014), nr.6
- [10] Billewicz K., Mikrokogeneracja – aspekty różne, nieuwzględnione w polskiej legislacji (Microgeneration – aspects which are not included in Polish legislation), *Rynek Energii*, 112 (2014), nr.3 [In Polish]
- [11] Milewski M., Discepoli G., Desideri U., Modeling the performance of MCFC for various fuel and oxidant compositions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (2014), 11713–11721
- [12] Li T., DaWei Tang, Li Z., Du J., Zhou T., Jia Y., Development and test of a Stirling engine driven by waste gases for the micro-CHP system, *Applied Thermal Engineering*, 33–34 (2012), 119–123
- [13] Bert J., Chrenko D., Sophy T., Moyne L. L., Sirot F., Simulation, experimental validation and kinematic optimization of a Stirling engine using air and helium, *Energy* 78 (2014), 701–712
- [14] Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S., Szulim P., Experimental research and application possibilities of microcogeneration system with Stirling engine, *Journal of Power Technologies*, 95 (Polish Energy Mix) (2015), 14–22
- [15] Chmielewski A., Lubikowski K., Radkowski S., Simulation of energy storage work and analysis of cooperation between micro combined heat and power (mCHP) systems and energy storage, *Rynek Energii*, 117 (2015), nr.2, 126–133
- [16] Chmielewski A., Lubikowski K., Radkowski S., Badania temperaturowe i analiza współpracy układu mikrokogeneracyjnego z silnikiem gazowym (Temperature-focused tests and cooperation analysis of microcogeneration system and gas engine), *Rynek Energii*, 118 (2015), nr.3, 56–63.
- [17] Cinar C., Karabulut H., Manufacturing and testing of a gamma type Stirling engine, *Renewable Energy*, 30 (2005), 57–66
- [18] Karabulut H., Huseyin, Yucesu S., Cinar C., Aksoy F., An experimental study on the development of a β -type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources. *Applied Energy*, 86 (2009), 68–73
- [19] Renzi M., Brandoni C. Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion, *Applied Thermal Engineering*, 67 (2014), 341–351
- [20] Rogdakis E.D., Antonakos G. D., Koronaki I. P., Thermodynamic analysis and experimental investigation of a Solo V161 Stirling cogeneration unit, *Energy*, 45 (2012), 503–511
- [21] Thombare D. G., Verma S. K., Technological development in the Stirling cycle engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2008), 1–38
- [22] Xiao G., Chen C., Shi B., Cen K., Ni M., Experimental study on heat transfer of oscillating flow of a tubular Stirling engine heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71 (2014), 1–7
- [23] Batmaz I., Ustun S., Design and manufacturing of a V-type Stirling engine with double heaters, *Applied Energy*, 85 (2008), 1041–1049
- [24] Ahmadi M. H., Sayyaadi H., Dehghani S., Hosseinzade H., Designing a solar powered Stirling heat engine based on multiple criteria: Maximized thermal efficiency and power, *Energy Conversion and Management* 75 (2013), 282–291.
- [25] Aksoy F., Karabulut H., Çınar C., Solmaz H., Önder Özgören Y., Uyumaz A. Thermal performance of a Stirling engine powered by a solar simulator, *Applied Thermal Engineering*, 86 (2015), 161–167
- [26] García D., González M.A., Prieto J. I., Herrero S., López S., Mesonero I., Villasante C., Characterization of the power and efficiency of Stirling engine subsystems, *Applied Energy*, 121 (2014), 51–63
- [27] Chmielewski A., Gumiński R., Radkowski S., Chosen properties of a dynamic model of crankshaft assembly with three degrees of freedom, *20th International Conference On Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), IEEE*, (2015), 1038-1043, ISBN: 978-1-4799-8700
- [28] Kuranc A., Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 17 (2015), n.1, 129–134
- [29] Lebedevas S, Dailydka S, Jastremskas V, Vaičiūnas G., Research of the rational operational load of diesel locomotives, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 16 (2014); n.4, 545–553
- [30] Kryszicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., Rachunek Prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, wyd. PWN, Warszawa, 2003