

Jacek Bartman
Uniwersytet Rzeszowski

**Autoreferat przedstawiający
opis dorobku i osiągnięć naukowych**

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Jacek Bartman

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

- Magister inżynier, Wydział Elektryczny, Politechnika Rzeszowska, 1989;
- Doktor nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Tytuł nadany decyzją Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w dniu 16 grudnia 1999 r., na podstawie rozprawy pt. *"Wpływ wybranych parametrów sztucznych sieci neuronowych na dokładność identyfikacji urządzeń energoelektronicznych"*

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1989-obecnie – pracownik naukowo-dydaktyczny oraz dydaktyczny Uniwersytetu Rzeszowskiego (do 2001 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie):

- 1989-2000 – asystent, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy (wcześniej Wydział Matematyczno-Fizyczny);
- 2000-2011 – adiunkt, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy;
- 2011-2018 – starszy wykładowca, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy;
- 2018-obecnie – starszy wykładowca, Uczelniane Centrum Dydaktyczne.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789): jednotematyczny cykl publikacji

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego / artystycznego

Analiza odkształcenia napięć i prądów oraz składowych mocy w układach z przebiegami niesinusoidalnymi

4.2. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- [1] **Jacek Bartman**, 2019, Analiza napięć, prądów i mocy w układach z przebiegami odkształconymi okresowymi, monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, s. 211. MNiSW 80.
- [2] **Jacek Bartman**, 2016, Accuracy of reflecting the waveforms of current and voltage through their spectrum determined by the standards regulating measurements, Revue Roumaine des sciences techniques - Serie Electrotechnique et Energetique, vol. 61, no 4, pp. 355-360. MNiSW 15, IF 1,036.

-
- [3] **Jacek Bartman**, 2017, The analysis of output voltage distortion of inverter for frequency lower than the nominal, *Journal of Electrical Engineering - Elektrotechnický časopis*, vol. 68, no 3, pp. 194–199, DOI: 10.1515/jee-2017–0028. MNiSW 15, IF 0,508.
 - [4] **Jacek Bartman**, Bogdan Kwiatkowski, 2018, The influence of measurement methodology on the accuracy of electrical waveform distortion analysis, *Measurement Science Review*, vol. 18, no.2, pp. 72-78. doi:10.1515/msr-2018-0011. MNiSW 20, IF 1,345.
 - [5] Anna Koziorowska, **Jacek Bartman** 2012, A-model as a way of squirrel cage induction motor modelling used in pumps drive system, *International Journal Of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices And Fields*, vol. 25, no. 2, pp. 103–114, MNiSW 15, IF 0,537.
 - [6] **Jacek Bartman J.**, Anna Koziorowska, 2008, Model systemu „zespół pompowy – przewód” ze sterowanym układem napędowym na potrzeby diagnostyczne, *Diagnostyka*, no. 2(46) pp.61-66, MNiSW 4pkt.
 - [7] **Jacek Bartman**, Anna Koziorowska, Kazimierz Kuryło, Wiesława Malska, 2011 Analiza rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 8, pp. 8-11. MNiSW 15, IF 0,244.
 - [8] Anna Koziorowska, Kazimierz Kuryło, **Jacek Bartman**, 2010, Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, no. 6, 279-284. MNiSW 13, IF 0,242.
 - [9] Anna Koziorowska, **Jacek Bartman**, 2014, The influence of reactive power compensation on the content of higher harmonics in the voltage and current waveforms, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, no. 1, pp. 136-140. MNiSW 10.
 - [10] **Jacek Bartman**, Dariusz Sobczyński, 2018, Analysis of the influence of selected non-linear devices on the waveform of supply voltage, *ITM Web Conferences*, vol. 21, 2018, Computing in Science and Technology (CST 2018), doi.org/10.1051/itmconf/20182100019.
 - [11] Tadeusz Kwater, **Jacek Bartman**, 2017, Application of artificial neural networks in non-invasive identification of electric energy receivers, 2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Kościelisko, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/PAEE.2017.8008982. WoS, MNiSW 15.

4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Omówienie tematyki badawczej i celu naukowego

Rosnące wymagania w zakresie energochłonności, rozwój elektroniki i systemów sterowania spowodowały, iż urządzenia o charakterze liniowym są zastępowane przez nowoczesne urządzenia o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych. Praca urządzeń nieliniowych powoduje, iż prąd płynący w obwodzie ma charakter odkształcony (niesinusoidalny). Odkształcenie przebiegu prądu lub napięcia powoduje komplikację jego pomiarów, przetwarzania i analiz oraz utrudnia opis zjawisk energetycznych zachodzących w układzie - pojawiają się dodatkowe komponenty mocy, zwiększające moc pozorną i pogarszające współczynnik mocy. Zasadniczym przedmiotem zainteresowania przedstawionym w jednotematycznym cyklu publikacji jest badanie elektrycznych przebiegów odkształconych okresowych. Celem badań było określenie, na podstawie analizy odkształcenia napięć i prądów, warunków oddziaływania odbiorników energii elektrycznej na źródło zasilania oraz składowe mocy, a także wskazanie możliwości nietypowych zastosowań parametrów opisujących odkształcenia przebiegów. Realizując założony cel badań Autor:

- opracował analizę wybranych koncepcji teorii mocy, projektując na jej potrzeby własne przykłady obliczeniowe, prezentujące rozważane koncepcje w kontekście eliminacji niepożądanych składowych mocy oraz natury odbiornika i źródła. Do oceny odkształcenia przebiegu prądu od przebiegu napięcia oraz od przebiegu sinusoidalnego zaproponował wykorzystanie specjalnie zdefiniowanych współczynników;
- wykonał szereg pomiarów dla różnych rodzajów odbiorników oraz różnych źródeł zasilania, ustalił warunki pomiarów przebiegów odkształconych przyrządami cyfrowymi w celu zapewnienia właściwego odwzorowania charakterystycznych cech przebiegu w dziedzinie czasu i częstotliwości;
- przeanalizował odkształcenia prądów i napięć określając ich parametry w kontekście oddziaływania odbiorników na źródło zasilania oraz wpływu na składowe mocy;
- opracował heterogeniczny model matematyczny złożonego układu rzeczywistego zawierającego nieliniowe urządzenia elektryczne, pozytywnie weryfikując wyniki symulacji danymi pomiarowymi;
- wykorzystał metody sztucznej inteligencji do modelowania oraz identyfikacji urządzeń technicznych.

Liczne przykłady w literaturze światowej świadczą o tym, iż przedstawione zagadnienia stanowią ważną problematykę badań naukowych, obejmując:

- pomiary i przetwarzanie przebiegów odkształconych [1.4¹, 1.5, 1.10, 1.11, 1.29, 1.30, 1.74, 1.78, 1.92, 1.136, 1.137, 1.148, 1.149, 1.155, 1.157, 1.181, 1.202, 1.203, 1.204, 1.218 1.219],
- analizę oddziaływania i opis transferu mocy (teorię mocy) nieliniowych odbiorników energii elektrycznej [1.2, 1.3, 1.8, 1.9, 1.32, 1.33, 1.35, 1.37, 1.40, 1.42, 1.46, 1.47–1.58, 1.60, 1.62, 1.67–72, 1.85, 1.87, 1.94, 1.97, 1.99, 1.101, 1.106, 1.114, 1.116, 1.119, 1.128, 1.130, 1.142, 1.143, 1.150, 1.152, 1.154, 1.158, 1.166, 1.167, 1.169, 1.170, 1.174, 1.183, 1.186, 1.187, 1.191, 1.192, 1.194, 1.196, 1.204, 1.205, 1.206, 1.212, 1.213, 1.218, 1.223–1.226, 1.227].

Przeprowadzone badania zostały podzielone na grupy tematyczne. Poniżej scharakteryzowano ich tematykę wskazując powiązane z nią prace, stanowiące monotematyczny cykl publikacji.

¹ Cytowania w formacie "a.b", odnoszą się do pozycji "b" literatury, umieszczonej w publikacji wymienionej na pozycji "a" jednolitego cyklu

Dla właściwego prowadzenia procesu cyfrowego przetwarzania sygnałów przy użyciu Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT) konieczne jest utrzymanie ścisłego reżimu pomiarowego. Niestety w przypadku niesinusoidalnych przebiegów elektrycznych jest to praktycznie niemożliwe. Przyczyną jest często występujący dryft częstotliwości napięcia zasilającego. Bezsprzecznie wpływa to na dokładność uzyskiwanych wyników. Jednak analiza każdego okresu przebiegu niezależnie jest w praktyce niemożliwa i niecelowa. A uzyskiwane na podstawie FFT wskaźniki odkształcenia typu: współczynnik zawartości harmonicznej (w_h), współczynnik zawartości wyższych harmonicznych (THD) czy współczynnik kształtu (CF) rozpatrywane są często w znaczeniu jakościowym. Przedstawione w cyklu badania wskazują, iż wykorzystanie do analizy odkształcenia napięcia i prądu w obwodach z odbiornikami nieliniowymi Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT), z uśrednianiem wartości analizowanych parametrów, pomimo jej niedoskonałości jest celowe i efektywne, rozważanie tego problemu przedstawiono w [2, 3, 4].

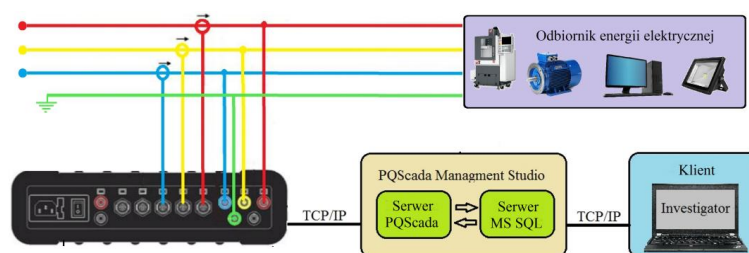
Ważkim problemem w analizach obwodów z odkształconymi przebiegami napięć i prądów jest analiza mocy, gdyż związany z nią transport energii jest praktycznie jedynym celem stawianym przed systemami energetycznymi. Dekompozycja mocy pozornej ma na celu wyodrębnienie składowych niepożądanych, mających charakter szkodliwy, powodujących jedynie zwiększenie wartości skutecznej prądu, w celu ustalenia przyczyn ich występowania, aby je w miarę możliwości wyeliminować. Niestety do tej pory nie sformułowano jednej powszechnie obowiązującej teorii mocy dla warunków niesinusoidalnych. Wprawdzie opracowano wiele definicji charakteryzujących moc bierną dla przebiegów odkształconych w układach elektrycznych, ale żadna z nich nie została powszechnie zaakceptowana jako obowiązująca. Zaprezentowany w monografii [1] raport pokazuje ewolucję opisu mocy, począwszy od koncepcji Iliovici, a skończywszy na koncepcji Tentiego i współpracowników oraz definicjach sugerowanych przez normę IEEE 1459. Spośród dużej liczby koncepcji opisu mocy wybrano, zdaniem autora, najistotniejsze, zwracając uwagę na ich wady i zalety oraz podkreślając ich wkład w rozwój teorii mocy. Ponieważ należy oczekiwać, że liczba odbiorników nieliniowych powodujących odkształcenia prądów i napięć będzie rosła, teorie mocy biernej będą miały coraz większe zastosowanie w takich zagadnieniach jak: nieaktywna kompensacja mocy, identyfikacja obciążenia harmonicznego, łagodzenie zakłóceń napięcia i pomiary energii.

W pracach wchodzących w skład cyklu publikacji zaprezentowano przykładowe analizy prądów, napięć i mocy rzeczywistych układów elektrycznych. Badania przeprowadzono dla urządzeń o różnych mocach, w różnych warunkach pracy (obejmujących również kompensację), podczas zasilania z sieci ogólnodostępnej oraz generatora asynchronicznego. Badania obejmowały analizy wartości skutecznej oraz kształtu prądu, oddziaływania zniekształceń prądu na napięcie zasilające oraz dekompozycje mocy zgodnie z normą IEEE 1459–2010. Do oceny odkształcenia napięcia i prądu wykorzystano wskaźniki uzyskane w wyniku analiz w dziedzinie czasu oraz analiz w dziedzinie częstotliwości. Przedstawione w pracach badania układów z odkształconymi przebiegami napięć i prądów odbiegają od tradycyjnego ujęcia tego zagadnienia. Główny akcent został położony na wzajemne zależności pomiędzy odkształceniami napięcia, prądu oraz obserwowanymi jako ich efekt zmianami w charakterze mocy. Dokładny opis oraz wnioski z badań każdego z urządzeń zawarto w pracach [1, 7, 8, 9, 10].

Badania symulacyjne stanowią bardzo atrakcyjną alternatywę w stosunku do eksperymentów wykonywanych bezpośrednio na obiekcie. Ich reprezentatywność oraz obiektywność zależy od szeregu czynników, takich jak przyjęte uproszczenia, wpływ zakłóceń, dokładność obliczeń i wiele innych mniej znaczących elementów. W pracach [5, 6] przedstawiono modelowanie nieliniowych urządzeń elektrycznych na przykładzie przemiennika częstotliwości. Opracowano heterogeniczny model matematyczny systemu wodociągowego, wykorzystując modelowanie matematyczne do

opisu silnika i przemiennika częstotliwości, rodzinę charakterystyk do opisu pompy oraz sieć neuronową do opisu rurociągu. Przeprowadzane symulacje miały na celu weryfikację jakościową wyników uzyskanych z modelu z danymi pomiarowymi uzyskanymi w rzeczywistej stacji wodociągowej.

Problematyka racjonalnego gospodarowania energią elektryczną jest aktualnym zagadnieniem, zwłaszcza dla małych odbiorców jakimi są gospodarstwa domowe. Istota zaprezentowanego postępowania opiera się na wskazaniu odbiornika, który ma decydujący udział w bilansie energetycznym bądź znalezienie innych odbiorników, dla których można ograniczyć zużycie energii. W tym celu można wykorzystać analizę odkształcenia prądu jako nośnik informacji oraz sztuczną sieć neuronową do bezinwazyjnej identyfikacji odbiorników pracujących w sieci energetycznej, tego typu koncepcję wraz wynikami zaprezentowano w pracy [11].



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Pomiary prezentowane i wykorzystywane w pracach zostały w większości wykonane przy użyciu mikroprocesorowego analizatora jakości energii Blackbox G4500 firmy Elspec klasy A, w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 1.

4.3.2. Omówienie prac wchodzących w skład monotematycznego cyklu publikacji.

Ad [1] Jacek Bartman, 2019, Analiza napięć, prądów i mocy w układach z przebiegami odkształconymi, monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, s. 211

Opisane w monografii koncepcje teorii mocy stanowią skróconą historię rozwoju badań w zakresie prób zdefiniowania składowych mocy oraz nadania interpretacji mocy biernej. Definicja składowych mocy powinna odzwierciedlać zjawiska fizyczne oraz posiadać wymiar inżynierski. W pierwszej części pracy przytoczono definicje mocy w obwodach z sinusoidalnymi przebiegami prądu, aby wskazać, które pojęcia można rozszerzyć na obwody z przebiegami odkształconymi okresowymi. Jednak zasadnicze rozważania merytoryczne obejmują prezentację teorii, przegląd pozycji bibliograficznych, w których sformułowano uwagi dotyczące przedmiotowej teorii oraz krytyczną dyskusję popartą przykładami obliczeniowymi.

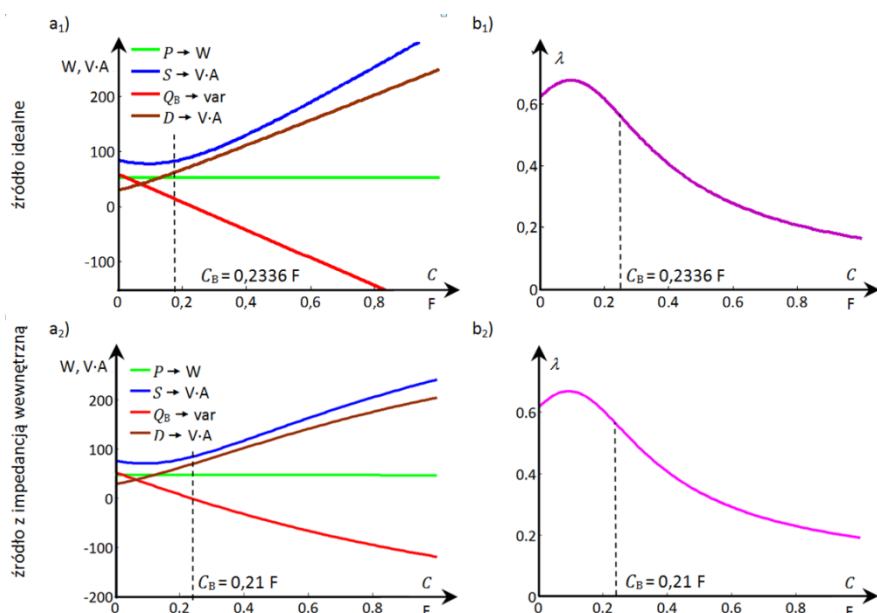
Wśród wielu definicji mocy dla obwodów z odkształconymi przebiegami prądu lub napięcia, które pojawiły się od momentu identyfikacji problemu z jej opisem, w pracy przedstawiono najistotniejsze koncepcje autorstwa: Iliovici [1.114], Budenau [1.35], Fryzego [1.85], Depenbrocka (Fryze-Buchholz-Depenbrock – FBD) [1.62], Shepherd i Zakikhaniego [1.187], Sharona [1.186], Kustersa i Moore’a [1.130], Czarneckiego (Currents Physical Components – CPC) [1.47, 1.48, 1.50], Tentiego i współpracowników (Conservative Power Theory – CPT) [1.205, 1.206], zalecenia normy IEEE 1459-2010 [1.112] oraz dwie koncepcje, które niekoniecznie stanowią pełną teorię mocy, ale są bardzo istotne: metodę mocy chwilowych p-q opracowaną przez Akagię, Kanazawę i Nabae [1.2] oraz metody optymalizacyjne podane przez Walczaka, Pasko i Siwczynskiego [191, 212]. Prezentacja każdej koncepcji zawiera jej opis matematyczny, komentarz podkreślający jej

cechy szczególne oraz uwagi innych badaczy ukazujące jej zalety oraz wskazujące na jej niedoskonałości. Wybrane koncepcje poddano autorskim analizom obliczeniowym.

A. Koncepcja Budeanu

W monografii przedstawiono analizę: sensu mocy bierniej Q_B , znaczenia mocy odkształcenia D oraz zbadano zachowawczość zdefiniowanych przez Budeanu składowych mocy.

Analiza zdefiniowanej przez Budeanu mocy bierniej (Q_B) wskazuje, iż moc ta może być równa zero nawet wówczas, gdy poszczególne jej składowe są niezerowe (wystarczy, że zeruje się ich suma). Wynika z tego, iż zjawisko zwrotnego przepływu energii dla różnych harmonicznych istnieje nawet wtedy, gdy moc bierna Budeanu wynosi zero. Tym samym moc pozorna, osiąga minimum, gdy moc bierna każdej harmonicznej jest równa zero, a nie gdy ich suma jest równa zero. Rozważanie potwierdza autorski przykład obliczeniowy wykonany dla układu ze źródłem idealnym oraz źródłem rzeczywistym. Symulacje wykazały, iż wartość pojemności kondensatora dobranej w celu wyzerowania mocy bierniej Budeanu nie prowadzi do maksymalizacji współczynnika mocy (rys.2b₁, rys.2b₂), ani dla układu zasilanego ze źródła rzeczywistego ani ze źródła idealnego, a tym samym kompensacja nie umożliwia minimalizacji ilości zużywanej energii (rys.2a₁, rys.2a₂). Potwierdza to tezę [1.51, 1.128, 1.212], iż przy pomocy koncepcji Budeanu nie jest możliwy dobór kompensatora minimalizującego wartość prądu. Ponadto przeprowadzone badania wykazały, że wzajemna wymiana energii przez różne harmoniczne wpływa nie tylko na moc bierną (Q_B), ale również na moc odkształcenia (D). Oznacza to, że żadna z tych dwóch wielkości nie jest jednoznacznie związana ze zwrotnym przepływem energii. Z tego powodu model Budeanu nie pozwala uzyskać danych koniecznych do poprawy współczynnika mocy [1.8, 1.49, 1.51]. Ponadto przeprowadzone analizy wskazują, iż kompensacja mocy bierniej Budeanu może prowadzić do wzrostu mocy odkształcenia (rys.2a). Przykłady pokazane w innych pracach [1.51] potwierdzają tę zależność.



Rys.2. Ilustracja zależności mocy zdefiniowanych przez Budeanu (a) i współczynnika mocy (b) od wartości kompensatora

Budeanu nie określił interpretacji mocy odkształcenia (D). W celu wyjaśnienia czy określenie "odkształcenia" oznacza, iż przebieg prądu jest odkształcony w stosunku do przebiegu napięcia

zasilania, czy też, w stosunku do przebiegu sinusoidalnego, konieczne jest ustalenie dla jakich warunków moc odkształcenia ma wartość równą zero. Wykorzystując zależności opisujące moce Budeanu wyznaczono warunki jej zerowania się:

$$\forall_{m,n=1\dots H} \left(\frac{U_m}{I_m} = \frac{U_n}{I_n} \wedge \varphi_m = \varphi_n \right). \quad (1)$$

Warunki (1) wskazują, iż moc odkształcenia nie pojawi się jeżeli pomiędzy napięciem i prądem występuje zależność liniowa i kąt przesunięcia wektora prądu względem wektora napięcia jest jednakowy (niezmienny) dla każdej harmonicznej. Oznacza to, iż nie ma korelacji pomiędzy odkształceniem napięcia względem prądu, a mocą odkształcenia.

W celu obliczeniowego wyznaczenia stopnia odkształcenia prądu względem napięcia zasilania Autor wprowadził wskaźnik w postaci wielkości pola ograniczonego przebiegiem prądu płynącego w obwodzie oraz wyliczonym prądem rezystancyjnym:

$$DF_u = \int_0^{T_0} \left| i(t) - \frac{I}{U} u(t - \tau) \right| dt. \quad (2)$$

Analogiczny wskaźnik wprowadzono w celu wyznaczenia stopnia odkształcenia przebiegu prądu względem przebiegu sinusoidalnego:

$$DF_{\sin} = \int_0^{T_0} |i(t) - \sqrt{2} I \sin(\omega(t - \tau))| dt. \quad (3)$$

gdzie: $i(t)$, $u(t)$ - przebiegi chwilowe prądu i napięcia,

I , U - wartości skuteczne prądu i napięcia,

τ - przesunięcie w czasie pomiędzy analizowanymi przebiegami.

Wykorzystując wprowadzone wskaźniki wykonano obliczenia, które pozwalają stwierdzić, iż zdefiniowana przez Budeanu moc odkształcenia nie jest ani miarą odkształcenia przebiegu prądu względem przebiegu napięcia zasilania ani przebiegu prądu względem przebiegu sinusoidalnego. Oznacza, to iż moc odkształcenia (D) nie odzwierciedla żadnego ze znanych zjawisk fizycznych.

Zgodnie z zasadą zachowania energii, w stanie ustalonym całkowita moc źródła musi być równa całkowitej mocy obciążenia. Przeprowadzone badania wskazują, iż w przypadku koncepcji Budeanu równania mocy czynnej (P) i mocy biernej (Q_B) są zgodne z zasadą zachowania energii, niestety równanie mocy odkształcenia (D) nie spełnia tej zasady. Zauważył to już w 1935r. Lyon, pytając w pracy [1.141] jak sumować moce odkształcenia. Niespójność z zasadą zachowania energii powoduje niespójność interpretacji mocy źródła i obciążenia co bardzo poważnie osłabia omawianą koncepcję.

B. Koncepcja Fryzego

Fryze uważał, iż rozważania z zakresu mocy dotyczą na tyle podstawowych wielkości, iż opis ich powinien być prowadzony w dziedzinie czasu, dlatego sceptycznie odnosił się do koncepcji Budeanu. W 1931 roku w pracy [1.85] zaproponował model dla odbiornika zasilanego z idealnego źródła napięcia, w którym prąd źródła rozłożył na dwie, wzajemnie ortogonalne, składowe: składnik pożądany (prąd czynny i_a) oraz składnik niepożądany (prąd bierny i_F). Składnik pożądany prądu odpowiada za doprowadzenie mocy czynnej ze źródła do odbiornika, zaś składnik niepożądany prądu należy wyeliminować gdyż jest on jedynie przyczyną strat.

Ponieważ koncepcja Fryzego dotyczy źródeł idealnych pierwsza analiza przedstawiona w monografii dotyczyła źródła idealnego. Dla zaproponowanego układu wyznaczono jego admitancję i prądy zdefiniowane przez Fryzego oraz zaproponowane przez niego moce. Następnie w celu

kompensacji mocy biernej wyznaczono parametry kompensatora, powodujące, wyzerowanie dla każdej harmonicznej odpowiadającej jej susceptancji. Kompensacja przyniosła oczekiwany efekt, moc bierna obwodu zmalała do zera, a współczynnik mocy uzyskał wartość 1. Jak wspomniano do wyznaczenia parametrów kompensatora wykorzystano susceptancję, uzyskane efekty wskazują, iż ma ona znaczący wpływ na opis energetyczny obwodu. Model Fryzego zupełnie pomija ten fakt mówiąc jedynie o konduktancji (G_e).

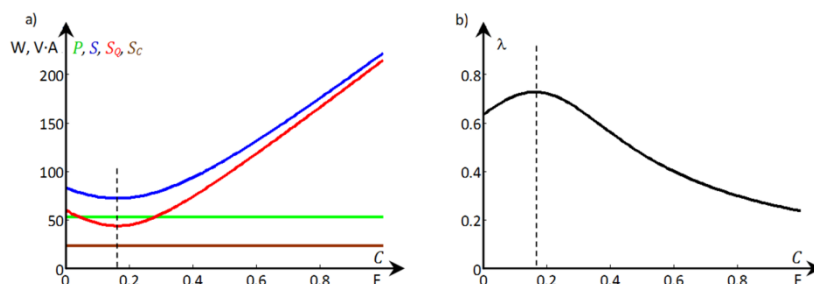
Kolejna przedstawiona w pracy analiza koncepcji Fryzego dotyczyła podobnego układu jak w przykładzie pierwszym, zmianie uległa jedynie pojemność kondensatora w obciążeniu. Wyznaczone moce miały identyczne wartości jak w przypadku pierwszym jednak kompensacja prowadziła do znacznie gorszych efektów. Oznacza to, iż dwa różne energetycznie obwody mają identyczny opis mocy w modelu Fryzego, co wskazuje na jej niejednoznaczność. Przyczyną tej niejednoznaczności jest objęcie pojęciem mocy biernej wszystkich składowych mocy pozornej, nie mających charakteru mocy czynnej.

Ostatnia analiza koncepcji teorii mocy opracowanej przez Fryzego przedstawiona w monografii dotyczyła układu, z parametrami odbiornika identycznymi jak w przykładzie pierwszym oraz z identycznym napięciem zasilania. Tym razem jednak uwzględniono niezerową impedancję wewnętrzną źródła. Postępując analogicznie jak w poprzednich przypadkach dokonano kompensacji mocy biernej. Kompensacja przyniosła oczekiwany efekt, moc bierna obwodu zmalała do zera, a współczynnik mocy uzyskał wartość 1, jednak zmianie uległa również wartość mocy czynnej (P). Należy podkreślić, iż wyznaczony dla przypadku ze źródłem o niezerowej impedancji wewnętrznej prąd czynny (i_a), był różny od prądu czynnego dla źródła idealnego. Oznacza to, iż podane przez Fryzego równanie definiujące prąd czynny nie jest spełnione dla obwodów ze źródłem o niezerowej impedancji wewnętrznej.

C. Koncepcja Sharona

Model Sharona stanowi uzupełnienie koncepcji Shepherd'a i Zakikhaniego, o brakującą w nim moc czynną P . Sharon wyodrębnił [1.186]: moc czynną (P) moc bierną (S_Q), obejmującą oddziaływanie wszystkich składowych napięcia ze składowymi prądu posiadającymi odpowiedniki w spektrum napięcia oraz dopełniającą moc bierną (S_C), obejmującą pozostałe efekty oddziaływań międzyczęstotliwościowych. Wraz teorią mocy, Sharon podał zależności umożliwiające wyznaczenie wartości elementów kompensujących.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu kompensacji mocy biernej na zdefiniowane przez Sharona moce zaprezentowano w monografii symulację pracy obwodu zasilanego napięciem niesinusoidalnym. Zgodnie z zaproponowaną przez Sharona zależnością wyznaczono wartość kompensatora. Kompensacja spowodowała poprawę współczynnika mocy λ . Wprawdzie nie osiągnął on idealnej wartości 1, ale wykres pokazany na rys. 3b wskazuje, iż udało się uzyskać maksymalną wartość możliwą do osiągnięcia. Wyodrębniona przez Sharona dopełniająca moc bierna (S_C), podobnie jak moc czynna (P) charakteryzuje się niewrażliwością na dołączenie (równoległe do odbiornika) reaktancji kompensacyjnej (rys.3a).

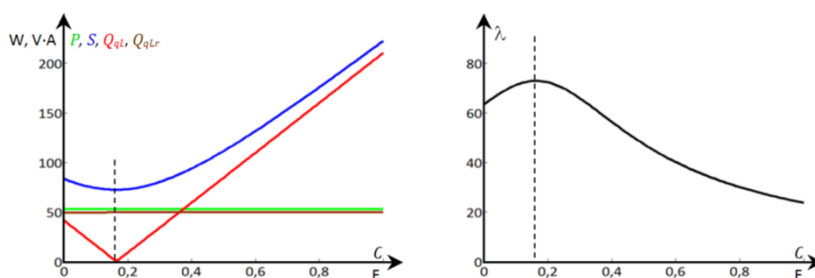


Rys. 3. Ilustracja zależności mocy zaproponowanych przez Sharona (a) oraz współczynnika mocy (b) od wartości kompensatora

Przeprowadzona w monografii analiza wskazuje, iż pozorna moc bierna przyjmuje wartość równą zero tylko wtedy gdy przebieg prądu jest nieodkształcony względem przebiegu napięcia i konduktancja obciążenia nie zależy od częstotliwości.

D. Koncepcja Kustersa i Moore'a

Kustres i Moore w opublikowanej w 1980 roku pracy [1.130] zaproponowali rozszerzenie opisu mocy zaproponowanego przez Fryzego. Dokonali podziału prądu źródła na prąd czynny (wg Fryzego) oraz, w zależności od typu obciążenia, na: pojemnościowy prąd bierny i pojemnościowy prąd szczytkowy lub indukcyjny prąd bierny i indukcyjny prąd szczytkowy. Indukcyjna moc bierna (Q_{qL}) oraz pojemnościowa moc bierna (Q_{qC}) są wielkościami oznaczonymi znakiem i mogą być one, całkowicie skompensowane przez wstawienie kondensora lub cewki indukcyjnej.



Rys. 4. Ilustracja zależności mocy zdefiniowanych przez Kustera-Moore'a (a) oraz współczynnika mocy (b) od wartości kompensatora

W celu przeprowadzenia analizy wpływu kompensacji mocy biernej na zdefiniowane przez Kustersa i Moore'a moce zaprezentowano w monografii przykład obliczeniowy. Uzyskane rezultaty (rys. 4) pozwalają zauważyć, iż moc czynna (P) oraz indukcyjna moc szczytkowa (Q_{qLr}) są niewrażliwe na dołączenie reaktancji kompensacyjnej (równoległe do odbiornika). Zaś sama kompensacja prowadzi do optymalnej wartości współczynnika mocy (rys.4b)

E. Metody optymalizacyjne w teorii mocy

Brak powszechnie akceptowalnych efektów prac na teorię mocy, skłoniły Walczaka, Pasko, Siwczyńskiego do zaproponowania odmiennego podejścia do tego zagadnienia. Autorzy koncepcji zrezygnowali z prób zdefiniowania składowych mocy, które opisywałyby zjawiska energetyczne w systemach pracujących w trybie odkształconym. Zaproponowali do opisu właściwości energetycznych i energetyczno-jakościowych podejście optymalizacyjne i postawili postulaty, których spełnienie pozwala na wykorzystanie tego typu metod. Określają one:

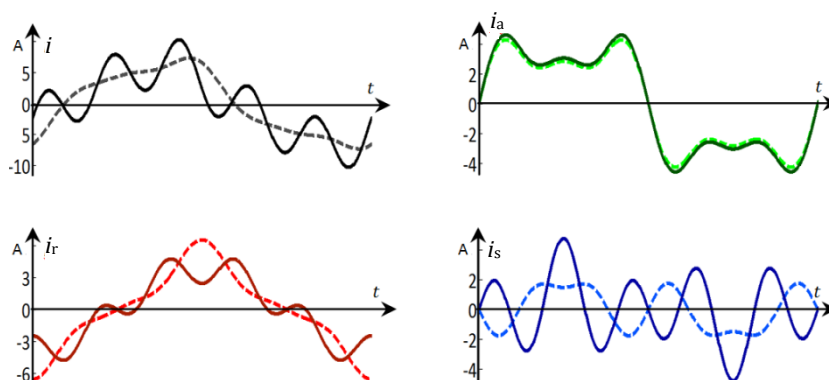
- dopuszczalny zbiór danych wejściowych, w postaci wartości skutecznych prądów i napięć, oraz wartości mocy czynnej,

- definicję prądu aktywnego, który określa optymalny punkt pracy obwodu,
- warunki jakie powinien spełniać wskaźnik jakości.

Metoda optymalizacyjna umożliwia optymalizację prądu źródła, według zdefiniowanych kryteriów, dzięki czemu jest uniwersalna. Szczególnym wyróżnikiem teorii optymalizacyjnej na tle innych koncepcji teorii mocy jest to, iż pozwala ona na opis właściwości energetycznych obwodów zasilanych ze źródeł o niezerowej impedancji wewnętrznej.

Autorzy metody wykorzystując nałożone kryteria znajdują prąd optymalny (i_a), zaś pozostały prąd bierny dzielą na, wzajemnie ortogonalne, składową reaktancyjną prądu źródła (i_r) oraz składową rozproszenia prądu źródła (i_s). Obie składowe prądu biernego można skompensować.

Metody optymalizacyjne mogą być stosowane dla układów wielofazowych. Autorzy sugerują wówczas rozkład prądu źródła na cztery składowe, wyróżniając dodatkowo składową asymetrii prądu.



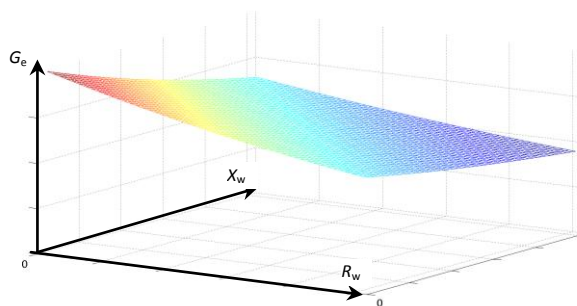
Rys. 5. Ilustracja pokazująca porównanie przebiegów prądu źródła i jego składowych w obwodzie z rzeczywistym źródłem zasilania przed kompensacją (linia przerywana) i po kompensacji (linia ciągła).

Omawiając w monografii metodę optymalizacyjną zwrócono uwagę, iż wykorzystywane we wszystkich "pełnych" teoriach mocy założenie ortogonalności prądów idealizuje źródło zasilania. Dlatego przedstawiono w niej analizę wpływu impedancji źródła na właściwości energetyczne układu. W tym celu przeprowadzono analizy obliczeniowe dla układu zasilanego ze źródła idealnego oraz dla układu zasilanego ze źródła rzeczywistego, a następnie porównano uzyskane wyniki. Symulacje wykazały, iż dla źródła idealnego w wyniku kompensacji zmianie uległy przebiegi prądu reaktancyjnego (i_r) oraz prądu rozproszenia (i_s), natomiast przebieg prądu czynnego (i_a) pozostał bez zmian. W przypadku źródła z niezerową impedancją wewnętrzną po kompensacji zmianie ulegają przebiegi wszystkich składowych prądu źródła (rys. 5). Oznacza to, że opis energetyczny układu zasilanego ze źródła rzeczywistego jest inny niż w przypadku układu zasilanego ze źródła idealnego. W wyniku kompensacji zmianie uległy również wartości skuteczne prądów.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, iż dla układu ze źródłem idealnym wartość skuteczna prądu źródła obliczona bezpośrednio jest równa wartości wyznaczonej ze składowych, przy założeniu ich ortogonalności. Dla układu rzeczywistego uzyskano różne wartości, świadczy to, iż w przypadku układów zasilanych ze źródła o niezerowej impedancji wewnętrznej składowe prądu nie są ortogonalne (co powszechnie zakładają inne koncepcje teorii mocy).

Wpływ rezystancji oraz reaktancji źródła na konduktancję zastępczą układu pokazuje rys. 6, wynika z niego, że wraz ze wzrostem któregośkolwiek z tych parametrów wartość konduktancji zastępczej maleje. Oznacza to, iż w przypadku źródła o niezerowej impedancji wewnętrznej

wartość konduktancji zastępczej G_e zależy nie tylko od rezystancji i reaktancji odbiornika, ale również od parametrów zasilania.



Rys. 6. Ilustracja zależności konduktancji zastępczej od rezystancji oraz reaktancji źródeła

Przedstawione analizy wskazują, iż uproszczenie modelu źródła do postaci źródła idealnego ma wpływ na opis właściwości energetycznych układu. Wydaje się, iż w tym wymiarze metoda optymalizacyjna posiada wyraźną przewagę na innymi teoriami mocy, szczególnie wartościowa jest możliwość optymalizacji właściwości układu według wybranego kryterium. Jednak jej złożoność oraz brak definicji składowych mocy stanowią pewien mankament.

F. Podsumowanie analizy teorii mocy

W pracy przedstawiono wnioski wynikające z przeglądu koncepcji teorii mocy oraz z zamieszczonych w niej przykładów obliczeniowych. Podkreślono, iż obecnie głównym powodem problemów są wyższe harmoniczne wynikające z pracy bardzo dużej liczby odbiorników nieliniowych, często o nieliniowościach spowodowanych pracą elektronicznych elementów przełączających. Dokonany przegląd wybranych, mających największe oddziaływanie, koncepcji teorii mocy oraz wykazane ich niedoskonałości wskazują, iż nie istnieje obecnie teoria mocy wyjaśniająca zjawiska energetyczne w obwodach elektrycznych oraz umożliwiającą minimalizację strat podczas przesyłu energii elektrycznej. Większość z nich koncentruje się na zgrabnym matematycznym przedstawieniu koncepcji autorów, definiując brakującą część prądu jako odrębną składową i wyznaczając go jako różnicę pomiędzy prądem rzeczywistym oraz wyodrębnionymi składowymi.

W oparciu o komentarze badaczy oraz przeprowadzone analizy przedstawione w monografii, Autor wymienił główne przyczyny przeszkadzające w opracowaniu spójnej i uniwersalnej teorii mocy:

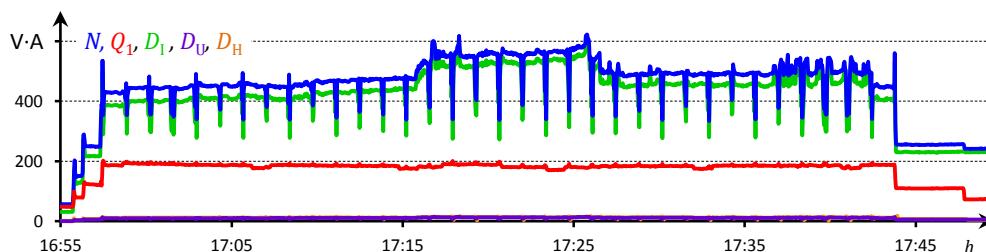
- W przypadku systemów sinusoidalnych moc określa się za pomocą wartości skutecznych. Podejście takie w przypadku układów niesinusoidalnych nie jest wystarczające. Wynika to z faktu, że wartość skuteczna jest wielkością wtórną reprezentującą prąd lub napięcie w oparciu o efekt cieplny. Wykorzystanie jej do reprezentowania sygnału sinusoidalnego o pojedynczej częstotliwości jest dopuszczalne, ponieważ informacja o częstotliwości nie jest tracona, gdyż sygnał ma tylko jedną częstotliwość. Jednak gdy sygnał ma charakter niesinusoidalny, a tym samym wieloczęstotliwościowy, reprezentacja w postaci wartości skutecznej prowadzi do utraty informacji o częstotliwości.
- Część proponowanych definicji mocy biernej jest ukierunkowana tylko na jeden cel, np. kompensację. Powoduje to, iż nie znajdują one ogólnego zastosowania. Co więcej, mogą niewłaściwie opisywać obciążenie lub zjawiska występujące w obwodzie elektrycznym.
- Wielu badaczy, stosując metody matematyczne, przekształca znane zależności, dostosowując je do systemów niesinusoidalnych bez dbałości o właściwą interpretację zjawisk oraz praktyczne wykorzystanie uzyskanych definicji.

- Większość teorii dokonuje rozkładu prądu na składowe, zakładając, iż są one wzajemnie ortogonalne. Założenie o ortogonalności składowych nie jest poparte żadnym uzasadnieniem i ma ono sens tylko dla źródeł idealnych, z zerową impedancją wewnętrzną [1.166].
- Niektóre definicje mają zastosowanie tylko dla układów trójfazowych i nie można ich stosować dla układów jednofazowych. Jeden z badaczy nawet wykazał matematycznie, że układ jednofazowy nie ma chwilowej mocy biernej [1.88]. Należy jednak zauważyć, że układy trójfazowe wywodzą się z układów jednofazowych, a występujące w obu zjawiska elektryczne są podobne. Słuszny wydaje się więc postulat, aby formułowane definicje miały zastosowanie do obu systemów.
- Rozkład prądu na składowe powinien być powiązany z rozkładem napięcia. Niektórzy badacze dokonują rozkładu prądu, a następnie obliczają moce, wykorzystując wartość skuteczną napięcia odkształconego, idealizując źródło, co stanowi duże uproszczenie.

W wielu publikacjach autorzy zauważają potrzebę opracowania teorii mocy, która powinna wyjaśnić zjawiska zachodzące w obwodzie elektrycznym, w szczególności ze względu na obciążenia nieliniowe występujące obecnie bardzo często w systemach elektroenergetycznych. Teoria powinna także uwzględniać pomiar energii oraz kompensację mocy biernej. Obecnie wątpliwości nie budzi jedynie definicja mocy czynnej oraz mocy biernej podstawowej harmonicznej. Można też dostrzec wspólną cechę większości dotychczas zaproponowanych definicji mocy biernej. Są one koncepcyjnie i teoretycznie podobne, ponieważ po prostu identyfikują część nieaktywnego prądu Fryzego, który można całkowicie skompensować.

G. Badanie odkształcenia napięć i prądów oraz ich wpływu na strukturę mocy

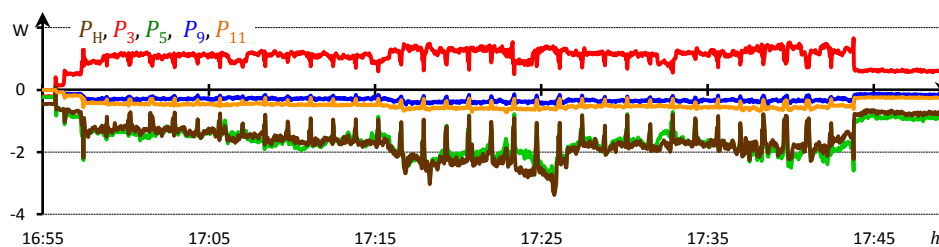
W rozdziale 3 monografii [1] przedstawiono analizy napięć i prądów w kontekście oddziaływania odbiorników nieliniowych na źródło zasilania oraz wpływu odkształceń przebiegów tychże wielkości na strukturę mocy.



Rys. 7. Ilustracja zmian mocy nieaktywnej oraz jej składowych.: mocy biernej pierwszej harmonicznej (Q_1 – kolor czerwony), mocy odkształcenia prądu (D_1 – kolor zielony), mocy odkształcenia napięcia (D_v) i mocy odkształcenia wyższych harmonicznych (D_H – kolor pomarańczowy)

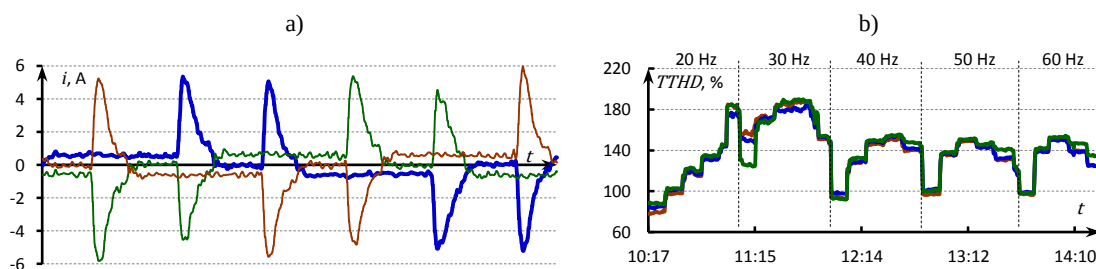
Badania przeprowadzone dla jednofazowej obrabiarki CNC o mocy 3,7 kW pokazały, iż urządzenie to ma silnie nieliniowy charakter, niezależnie od cyklu pracy płynący prąd był odkształcony. Znaczne odkształcenie prądu powodowało, iż wyższe składowe jego widma miały duże wartości, które w połączeniu z podstawową składową napięcia były przyczyną powstawania dużej mocy odkształcenia prądu (D_1) (rys 7). Moc ta ma charakter szkodliwy i jest efektem nieliniowości odbiornika. Warto zauważyć, iż wartości mocy odkształcenia prądu były zdecydowanie większe od wartości mocy biernej składowej podstawowej (rys. 7). Pomimo dużego odkształcenia prądu (THD od 58% do 103%) moc czynna była przenoszona głównie przez harmoniczne podstawowe, zaś moc czynna przenoszona przez wyższe harmoniczne miała ujemny znak, co oznacza, iż przepływ energii czynnej transportowanej przez te harmoniczne odbywał się

od odbiornika do źródła (rys. 8). Nie stwierdzono, aby praca obrabiarki skutkowała dostrzegalnym odkształceniem napięcia zasilania (napięcia sieciowego).



Rys. 8. Ilustracja udziału mocy czynnej wyższych harmonicznych

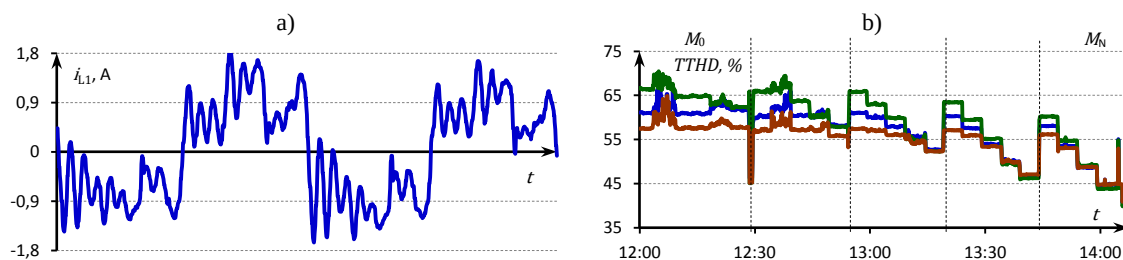
Najobszerniejsze badania wykonano dla układu napędowego złożonego z przemiennika częstotliwości oraz silnika indukcyjnego (1,5 kW), pomiary zrealizowano dla dwóch różnych systemów zasilania. W pierwszym przypadku napęd był zasilany z ogólnodostępnej sieci energetycznej, zaś w drugim z generatora asynchronicznego o mocy 12 kW. Pomiary przeprowadzono dla pięciu różnych wartości obciążenia oraz dla częstotliwości zmieniających się w zakresie od 20 Hz do 60 Hz (co 10 Hz). Dla obu przypadków przebadano więc po 25 różnych stanów pracy. W niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko wybrane analizy oraz wskaźniki ogólne (całość badań została opisana w pracy [1]).



Rys. 9. Widok przykładowych przebiegów prądów chwilowych napędu przy zasilaniu z sieci (a) oraz ich spektrum (b) (faza L1 – kolor niebieski, L2 – kolor zielony, L3 – kolor brązowy)

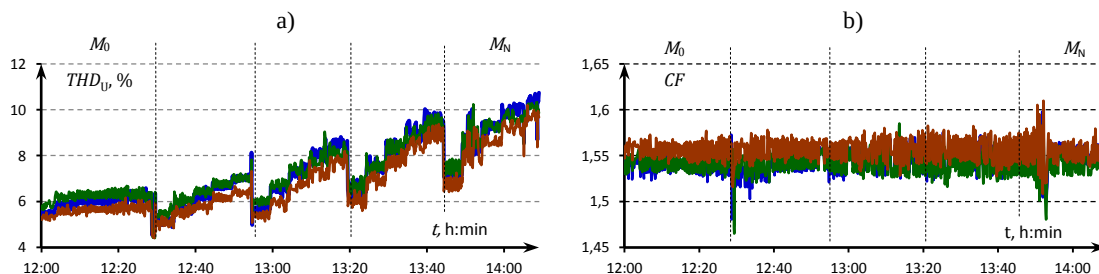
Podczas zasilania układu z sieci ogólnodostępnej prądy płynące przez odbiornik, charakteryzowały się bardzo dużym odkształceniem, widocznym zarówno w kształtach przebiegów (rys.9a), jak i w ich widmach. Wartość współczynnika odkształcenia prądu $TTHD$ w każdej z faz praktycznie w całym zakresie badań była bardzo duża i przekraczała 100% (rys.9b), osiągając maksymalnie ok 180%. Wartość współczynnika szczytu CF w całym zakresie badań wynosiła od 2,6 do 4,5 i była znacznie większa od wartości charakterystycznej dla przebiegów sinusoidalnych wynoszącej $\sqrt{2}$. W trakcie pracy układu napędowego przy zasilaniu z sieci ogólnodostępnej nie zaobserwowano jakiegokolwiek wpływu pracującego napędu na parametry napięcia zasilającego.

Druga część badań dotyczyła napędu regulowanego zasilanego z generatora asynchronicznego. Analiza kształtu prądu pokazanego na rys. 10a wskazuje, iż prąd płynący przez napęd był odkształcony. Jednak, dla tych samych warunków pracy, odkształcenie jego przebiegu było zupełnie inne niż w przypadku zasilania napędu z sieci (porównaj rys. 9a i rys. 10a). Wartość współczynnika $TTHD$ prądu podczas badań napędu zasilanego z generatora wahała się w przedziale od 40% do 70% (rys. 10b) i była znacznie mniejsza niż w przypadku zasilania z sieci (rys. 9b). Zauważalny był również, dla większego obciążenia, spadek odkształcenia prądu (porównaj rys. 9b z rys. 10b). W trakcie pracy napędu przy zasilaniu z generatora wartość współczynnika szczytu (CF) wahała się w przedziale od 1,5 do 2,4.



Rys. 10. Widok przykładowego kształtu przebiegu prądu chwilowego fazy L1 podczas zasilania napędu z generatora (a) oraz spektrum prądów trzech faz (b), (faza L1 – kolor niebieski, L2 – kolor zielony, L3 – kolor brązowy)

Podczas zasilania napędu z generatora wraz ze wzrostem obciążenia, napięcie zasilania ulegało coraz to większemu odkształceniu. Zarówno zwiększenie obciążenia, jak i zwiększanie częstotliwości napięcia zasilającego napęd powodowały wzrost wartości współczynnika THD_U (rys. 11a). Zmiany obciążenia napędu oraz zmiany częstotliwości napięcia zasilającego silnik indukcyjny nie wpływały na wartość współczynnika szczytu (CF).



Rys. 11. Ilustracja zmian wartości współczynnika zawartości harmonicznych (THD) w napięciu podczas pomiarów (a), współczynnika szczytu (CF) (b). M_0 – bieg jałowy, M_N – moment znamionowy. Dla każdego momentu częstotliwości była zmieniana od 20 Hz do 60 Hz z krokiem 10 Hz. Faza L1 – kolor brązowy, L2 – kolor zielony, L3 – kolor niebieski

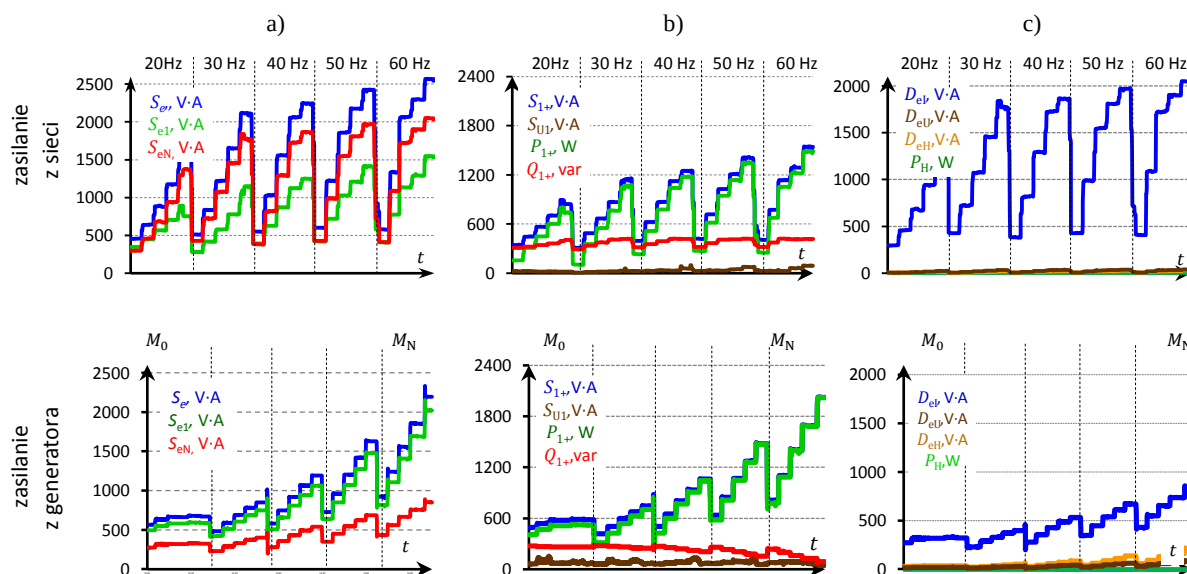
Przedstawione w pracy badania regulowanego napędu indukcyjnego zasilanego z dwóch źródeł napięcia, o bardzo różnych mocach zwarcia, pozwoliły stwierdzić, iż:

- w przypadku zasilania napędu z sieci ogólnodostępnej odkształcenie płynącego prądu było znacznie większe niż podczas zasilania napędu z generatora;
- oddziaływanie napędu na źródło zasilania odnotowano tylko w przypadku zasilania napędu z generatora. Odkształcenie prądu odbiornika spowodowało odkształcenie napięcia zasilającego. Wraz ze wzrostem wielkości obciążenia, mimo, iż malało odkształcenie prądu, wzrastało odkształcenie napięcia.

W pracy przeprowadzono również analizę struktury mocy dla zasilania z sieci ogólnodostępnej oraz dla zasilania z generatora asynchronicznego. Analiza komponentów mocy miała na celu ocenienie, które składowe posiadają największy wkład w pobieraną przez urządzenie moc oraz jak oddziaływanie odbiornika na kształt napięcia zasilającego w przypadku zasilania z generatora wpłynęło na strukturę mocy. Wyniki badań (rys. 12) wskazują, iż struktura mocy podczas zasilania napędu z sieci ogólnodostępnej była inna niż podczas zasilania napędu z generatora, którego napięcie ulegało odkształceniu pod wpływem pracy tegoż napędu. Zmniejszenie się odkształcenia prądu podczas zasilania napędu z generatora, w stosunku do odkształcenia podczas zasilania z sieci oraz niewielkie zwiększenie się odkształcenia napięcia, obserwowane podczas zasilania napędu z generatora spowodowały zmianę rozkładu pobieranej mocy:

- zmalał, w efektywnej mocy pozornej (S_e), udział efektywnej mocy pozornej odkształcenia (S_{eN} - linia czerwona na rys. 12a),
- wzrósł udział podstawowej efektywnej mocy pozornej (S_{e1} - linia zielona na rys.12a) związanej ze składowymi podstawowymi prądu i napięcia,
- zmniejszyła się wartość mocy biernych składowych podstawowych (Q_{1+} - linia czerwona na rys. 12b),
- zmalała wartość mocy odkształcenia prądu (D_1 - linia niebieska na rys. 12c) wchodzącej w skład w efektywnej mocy pozornej odkształcenia (S_{eN} - linia czerwona na rys. 12a),
- w efekcie nastąpiła poprawa współczynnika mocy.

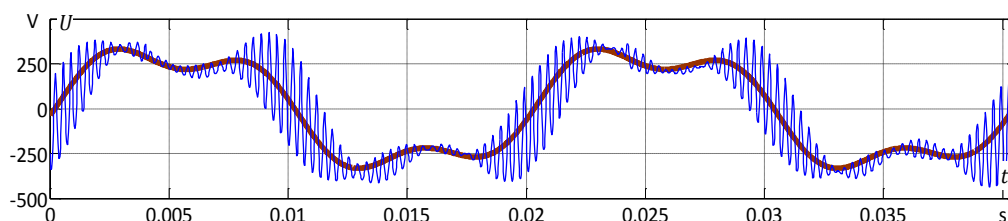
Oznacza to, iż odkształcenia napięć i prądów oraz oddziaływanie odbiornika na źródło zasilnia mają wpływ na strukturę mocy i efektem oddziaływania może być poprawa struktury mocy pobieranej przez odbiornik.



Rys. 12. Ilustracja zmian: efektywnej mocy pozornej silnika i jej składowych w trakcie pomiarów (a), podstawowej mocy pozornej niezbilansowania (S_{U1} – kolor brązowy) i podstawowej mocy pozornej zgodnej kolejności (S_{1+} – kolor niebieski) oraz jej składowych: mocy czynnej zgodnej kolejności (P_{1+} – kolor zielony) i mocy biernych zgodnej kolejności (Q_{1+} – kolor czerwony) (b), składowych efektywnej mocy odkształcenia (D_{e1} – kolor niebieski, P_H – kolor zielony, D_{eU} – kolor brązowy, D_{eH} – kolor pomarańczowy) (c).

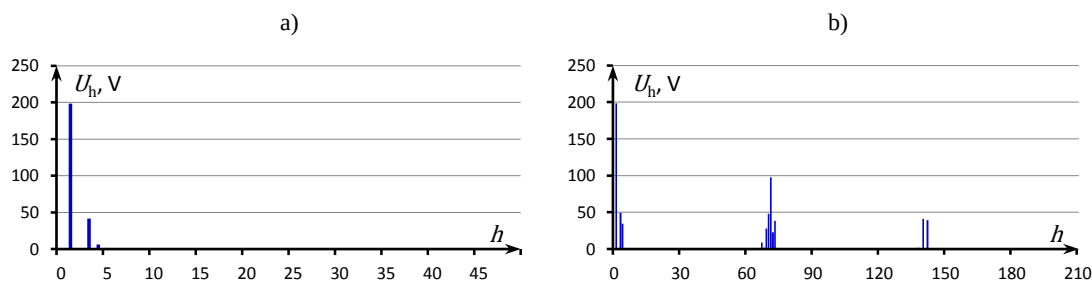
Ad [2] Jacek Bartman, 2016, Accuracy of reflecting the waveforms of current and voltage through their spectrum determined by the standards regulating measurements, Revue Roumaine des sciences techniques - Serie Electrotechnique et Energetique, vol. 61, no 4, pp. 355-360

W pracy przedstawiono zalecenia norm podających definicje oraz opisujących zagadnienia pomiaru harmoniczných i interharmoniczných. Opisano problemy jakie pojawiają się podczas analizy sygnału gdy w mierzonym przebiegu występują interharmoniczne. Przytoczono przykładowe wyniki pomiarów wykonanych dla kilku różnych częstotliwości wyjściowych napięcia przemiennika częstotliwości, poddając analizie zawartość harmoniczných i interharmoniczných, a także wierność odwzorowania pierwotnych przebiegów prądów i napięć.



Rys.13. Przebieg napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości dla częstotliwości 49.7 Hz. Sygnał oryginalny - linia niebieska, sygnał odtworzy z widma - linia brązowa

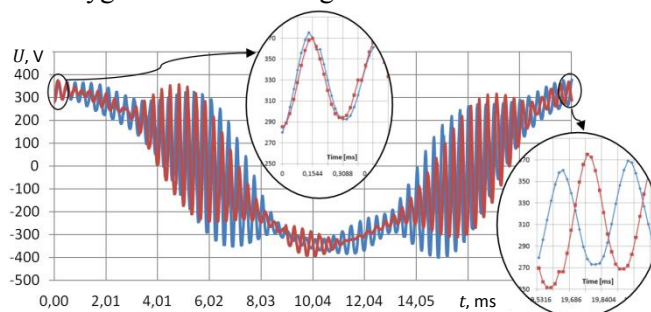
W pracy przedstawiono analizy, pokazujące, iż odtwarzając na podstawie uzyskanego widma amplitudowego i fazowego napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości uzyskujemy przebieg odzwierciedlający charakter sygnału pierwotnego (rys.13), jednak odtworzony sygnał pozbawiony został charakterystycznych wysokoczęstotliwościowych oscylacji. Ustalono, iż stosowanie się do zapisów normy nie daje gwarancji odtworzenia pierwotnego sygnału gdyż zawarte w normie IEC 61000-4-7 (PN-EN 61000-4-7) ograniczenie obserwowanego widma do 50/40 składowych powoduje, że w niektórych przypadkach mogą zostać pominięte harmoniczne znacząco wpływające na analizowany przebieg (rys. 14);



Rys.14. Spektrum napięcia o częstotliwości 42,5 Hz wyznaczone zgodnie z normą PN-EN 61000-4-7 (a) oraz spektrum uwzględniające wszystkie niezerowe składowe (b)

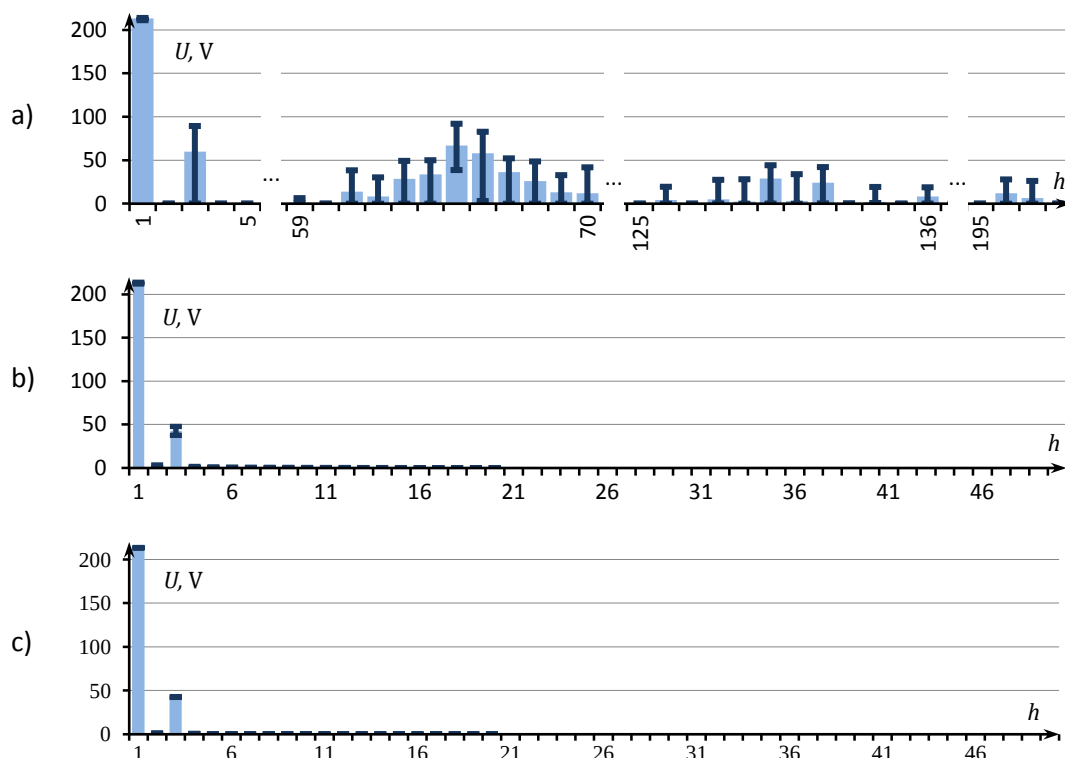
Ad [3] Jacek Bartman, 2017, The analysis of output voltage distortion of inverter for frequency lower than the nominal, Journal of Electrical Engineering, vol. 68, no 3, pp. 194–199, DOI: 10.1515/jee-2017–0028. MNiSW 15, IF 0,508

Praca przedstawia badania dotyczące odkształcenia napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości w zależności od jego częstotliwości. Dla trzech różnych częstotliwości, niższych od 50Hz, przedstawiono zmiany wartości skutecznej napięcia THD_U , harmoniczných oraz interharmoniczných. Dodatkowo pokazano jak te wartości zmieniają się w zależności od czasu agregacji, prezentując na wykresach przebiegi cykl po cyklu, uśrednione w 10 okresach oraz uśrednione w 150 okresach sygnału analizowanego.



Rys. 15. Kolejne dwa nałożone na siebie cykle przebiegu napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości

Badania wskazują jednoznacznie, iż sygnał napięciowy generowany przez przemiennik częstotliwości nie jest okresowy (rys. 15), jednak charakteryzuje się pewną regularnością, właściwym więc wydaje się zaliczenie napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości do grupy przebiegów określanych mianem quasi-okresowych lub prawie okresowych.



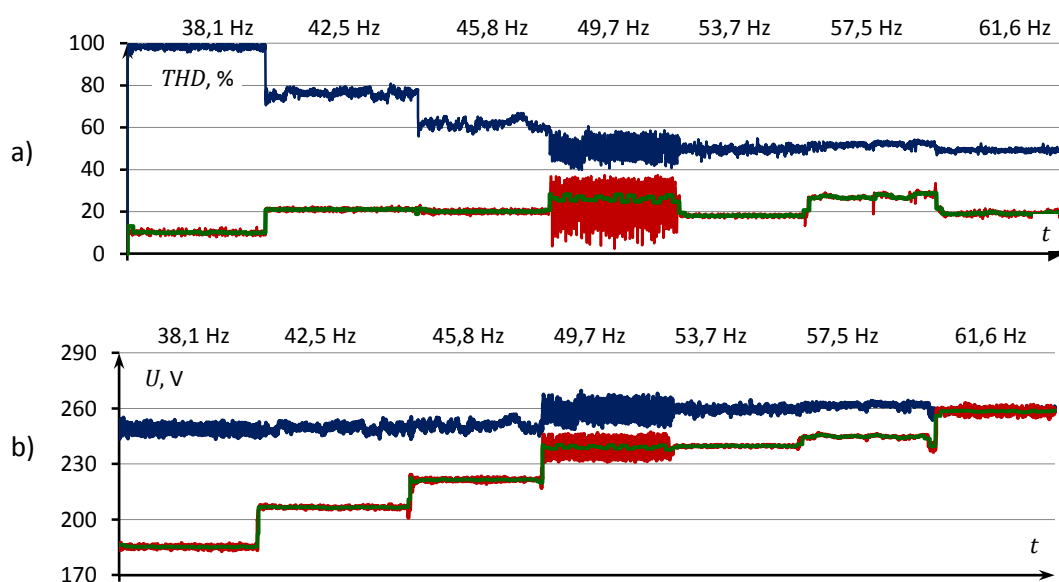
Rys 16. Spektrum harmoniczných wyznaczone w trybie cykl po cyklu (a), z uśrednianiem w 10 okresach (b), z uśrednianiem w 150 okresach (c). Kolorem granatowym zaznaczono zakres zmian wartości amplitudy harmonicznej

Dalsze przedstawione w pracy badania dotyczyły wpływu zalecanego przez normę IEC 61000-4-30 (PL-EN 61000-4-30) uśredniania wartości na uzyskiwane rezultaty. Porównując zawartość harmoniczných dla konkretnej częstotliwości zauważono, iż wraz ze wzrostem czasu uśredniania pomiaru mierzone wartości się stabilizują (maleje ich rozrzut). Pomiary wykonane dla każdego okresu oddzielnie (w trybie cykl po cyklu) wskazują na bardzo duże wahania harmoniczných, niezależnie od częstotliwości wyjściowej przemiennika (rys. 16a). Analizy wykonane w oknie o czasie równym 10-ciu okresom (rys. 16b) pokazują, iż wahania maleją, zaś analizy uśrednione w 150 okresach (rys. 16c) pokazują, iż wahania praktycznie nie występują. Duże wahania wartości harmoniczných wyliczanych w poszczególnych okresach (rys. 16a) są kolejnym dowodem na quasi-okresowość sygnału. Fakt, iż uśrednienie wielkości harmoniczných w dłuższym przedziale czasowym praktycznie niweluje ich wahania (rys. 16c) świadczy o pewnej regularności sygnału. Ponadto analiza wskazuje, iż pomimo niemożliwości dokładnego wyznaczenia podstawowej częstotliwości Fouriera, zastosowanie do analizy przebiegów Dyskretnej Transformaty Fouriera jest możliwe. Przedstawione badania potwierdziły, iż ograniczenie widma harmoniczných do 50/40 składowych (zgodnie z IEC 61000-4-7) może powodować, iż analiza częstotliwościowa nie będzie uwzględniała wielu składowych o znaczących wartościach (rys 16)

Ad [4] Jacek Bartman, Bogdan Kwiatkowski, 2018, The Influence of Measurement Methodology on the Accuracy of Electrical Waveform Distortion Analysis, Measurement Science Review, vol. 18, no.2, pp. 72-78. doi:10.1515/msr-2018-0011

Artykuł stanowi kontynuację i rozszerzenie badań opisanych w pracach [2] i [3]. Omówiono w nim wybrane wskaźniki odkształcenia przebiegów okresowych. Przedstawiono analizy porównujące wartości opisanych wskaźników, stosując metodologię pomiarów sugerowaną w normie IEC 61000-4-7 oraz pomiary w trybie cykl po cyklu dla napędu indukcyjnego zasilanego za pośrednictwem przemiennika częstotliwości dla różnych częstotliwości składowej podstawowej

W pierwszej części pracy dokonano analizy napięcia, poszerzając badania przedstawione w [3] o częstotliwości napięcia wyjściowego wyższe od 50 Hz. Badania potwierdziły, iż ograniczenie zakresu harmoniczných do 50/40 składowych może prowadzić do pominięcia znaczących składowych widma.



Rys. 17. Zmiany THD_U (a) oraz wartości skutecznej napięcia (b) zarejestrowane dla różnych częstotliwości napięcia, podczas pomiarów w trybie cykl po cyklu (linia granatowa) oraz zgodnie z normą IEC 61000-4-30 (linia czerwona, linia zielona).

Analizy pomiarów wartości skutecznej napięcia (rys. 17a), wartości współczynnika THD_U (rys. 17b) oraz współczynnika szczytu CF pokazały, iż pomiary wykonane zgodnie z zaleceniami normy IEC 61000-4-30 wykazują znacznie mniejszą wartość współczynnika THD_U oraz wartości skutecznej napięcia niż pomiary wykonane cykl po cyklu. Spowodowane jest to nieuwzględnieniem w pomiarach zgodnych z normą, harmoniczných powyżej 50-tej (40-tej).

Przedstawione w pracy badania wykazały, iż posługiwanie się analizatorami wykonującymi pomiary zgodnie z normami IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30, do pomiaru sygnałów silnie odkształconych może powodować błędy, wynikające z ograniczenia zakresu analizowanych składowych widma przebiegu.

Ad [5] Anna Kozirowska, Jacek Bartman, 2012, A-model as a way of squirrel cage induction motor modelling used in pumps drive system, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, vol. 25, no. 2, pp. 103–114

Zasadniczym celem pracy była adaptacja równań różniczkowych silnika indukcyjnego do modelowania i symulacji grupy urządzeń: silnik indukcyjny z przemiennikiem częstotliwości i pompą odśrodkową zasilającą sieć wodociągową. Dokonano przeglądu różnych typów modeli matematycznych wyszczególniając ich zalety i wady. Szczególną uwagę zwrócono na ich dokładność oraz łatwość zastosowania metod numerycznych do ich rozwiązywania. Uzyskane informacje pozwoliły ocenić poszczególne typy modeli w kontekście zastosowania ich do opracowania modelu silnika indukcyjnego wchodzącego w skład układu napędowego pomp. Zdecydowano, iż silnik zostanie opisany przy pomocy modelu typu A bazującego na teorii obwodów elektromagnetycznych. O wyborze zdecydowały dwie ważne cechy modeli typu A: równania różniczkowe pozwalają wyznaczyć bezpośrednio prądy i strumień główny oraz są one w normalnej formie Cauchy'ego.

Podstawowe równania silnika zapisano w postaci:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \frac{1}{K} \mathbf{A}(\mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Psi}) \quad (4)$$

$$K = \alpha_r + \alpha_s + \alpha_m,$$

$$\mathbf{u} = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$\mathbf{i} = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{ra} \quad i_{rb}]^T,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 \\ 0 & \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r \\ -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) & 0 \\ 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \frac{i_{sa} + i_{ra}}{\alpha_m} + \frac{i_{ra}}{\alpha_r} \\ \frac{i_{sb} + i_{rb}}{\alpha_m} + \frac{i_{rb}}{\alpha_r} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2r_{sa} + r_{sb}) & \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sb}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sa}) & \frac{1}{3}(2r_{sb} + r_{sc}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\sqrt{3}} & -\frac{2\omega}{\sqrt{3}} \\ \frac{\omega}{\sqrt{3}} & \frac{2\omega}{\sqrt{3}} \end{bmatrix},$$

zaś równanie ruchu w postaci:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_E - T(\omega)), \quad (5)$$

$$T_E = \frac{\sqrt{3}p(i_{ra}i_{sb} - i_{rb}i_{sa})}{\tau},$$

gdzie:

$T(\omega)$ – moment mechaniczny;

p – liczba par biegunów;

J – moment bezwładności;

T_E – moment elektromagnetyczny;

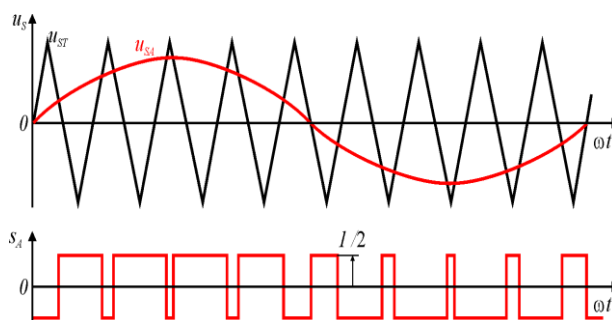
r_{sa}, r_{sb}, r_{sc} – wartości rezystancji faz stojana;

$i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}, i_{rb}$ – wartości prądów stojana i wirnika;

r_r – wartość rezystancji wirnika;

α_m – odwrotność indukcyjności magnesującej;

α_s , α_r – odwrotność indukcyjności stojana i wirnika.



Rys. 18. Przebiegi funkcji przełączających $s_A(t)$ dla sinusoidalnej fali modulującej

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych zastosowany został model falownika napięciowego PWM modulowanego metodą SPWM, co odpowiada przekształtnikowi zastosowanemu w układzie napędowym pomp. Porównując wzorcowy sygnał sinusoidalny (u_{sk}) z przebiegiem trójkątnym (u_{st}) uzyskano przebieg napięcia zasilającego silnik z regulowaną prędkością obrotową (rys. 18). Uzyskany przebieg ma charakter dwuwartościowej funkcji przełączającej:

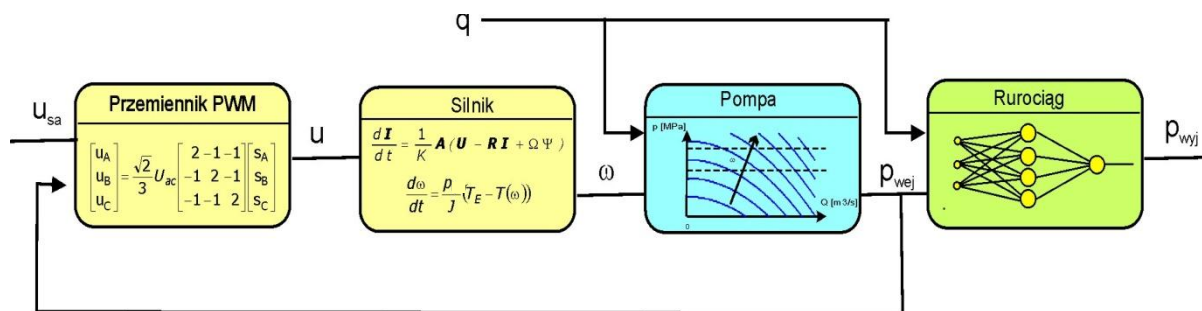
$$s_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{dla } u_{st}(t) \leq u_{sk}(t) \\ -1 & \text{dla } u_{st}(t) > u_{sk}(t) \end{cases}, \quad k \in \{L_1, L_2, L_3\} \quad (6)$$

Badania symulacyjne wykonano wykorzystując parametry rzeczywistego zespołu pompowego, w skład którego wchodziły: silnik indukcyjny klatkowy typ SLg 280M2, pompa typ 150 PJM 250, przekształtnik częstotliwości PWM ACS 503-100-3 firmy ABB zawierający regulator PI. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla wielokrotnych zmian przepływu wody. Jest to stan zbliżony do naturalnych wahań przepływu występujących w rzeczywistym, pracującym systemie wodociągowym. Symulacje wykazały, iż układ utrzymuje ciśnienie w założonym przedziale, dostrajając prędkość obrotową pompy, zaś prąd nie przekracza dopuszczalnych wartości wynoszących dwukrotność prądu znamionowego. Analizując uzyskane rezultaty stwierdzono, iż przyjęte modele opisujące układ odzwierciedlają jakościowo pracę systemu rzeczywistego w ocenianym zakresie. Zastosowanie A-modeli wyeliminowało konieczność odwracania macierzy impedancji co wpłynęło na poprawę złożoności obliczeniowej metody.

Ad [6] Jacek Bartman, Anna Koziorowska, 2008, Model systemu „zespół pompowy – przewód” ze sterowanym układem napędowym, na potrzeby diagnostyczne – Diagnostyka 2(46) pp.61-66

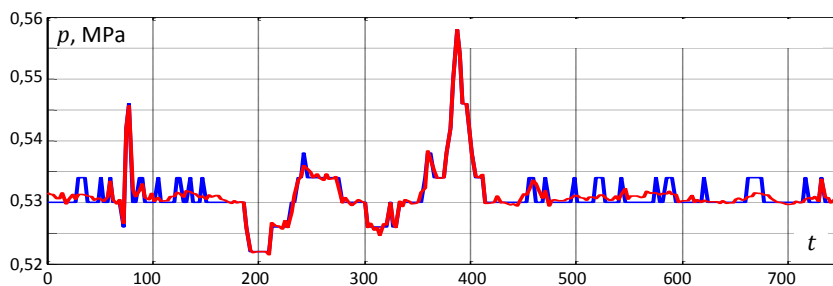
Przedmiotem pracy była konstrukcja modelu systemu „zespół pompowy – rurociąg” składającego się z przemiennika częstotliwości, silnika napędowego, pompy oraz rurociągu. Idea pracy systemu opierała się na stabilizacji ciśnienia tłoczenia wody w rurociągu poprzez częstotliwościową regulację prędkości silnika napędzającego pompę tłoczącą. W pracy przedstawiono topologię systemu oraz jego opis analityczny. Układ opisano wykorzystując modelowanie matematyczne, modelowanie neuronowe oraz charakterystyki statyczne (rys.19). Wykorzystanie modelowania neuronowego do opisu rurociągu oraz charakterystyk statycznych do

opisu pompy pozwala przeprowadzić proces modelowania bez znajomości parametrów tych elementów. Praca stanowi rozwinięcie modelu opisanego w pracy [5].



Rys. 19. Schemat modelu systemu „zespół pompy – przewód” uwzględniający specyfikę modeli poszczególnych jego elementów. Kolorem żółtym oznaczono elementy opisane poprzez równania matematyczne, niebieskim opisane przez charakterystyki a zielonym modelowane neuronowo

Adekwatność przedstawionego w artykule modelu układu "zespół pompy - rurociąg" określono porównując wyniki symulacyjne z rezultatami uzyskanymi z pomiarów. Porównanie to (rys. 20) pokazało, iż praca rurociągu jest modelowana w sposób zadawalający.

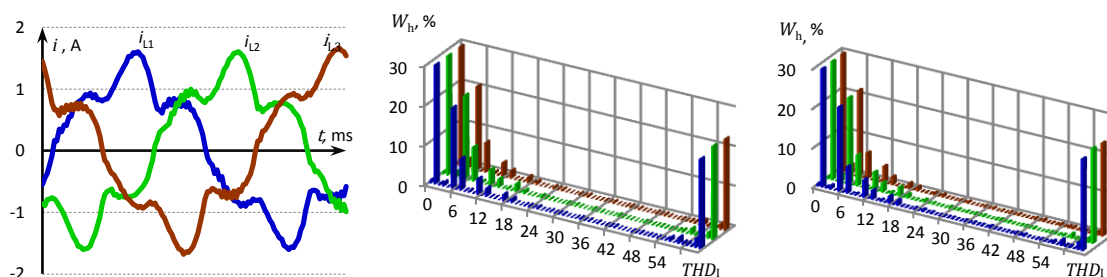


Rys. 20. Przebieg ciśnienia tłoczenia uzyskany z pomiarów (kolor niebieski) oraz z modelu neuronowego (kolor czerwony)

Ad [7] Jacek Bartman, Anna Koziorowska, Kazimierz Kuryło, Wiesława Małska, 2011 Analiza rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, no. 8, pp. 8-11

W artykule przedstawiono badania przeprowadzone w stacji uzdatniania wody, których celem była analiza przebiegów prądów i napięć zawierających wyższe harmoniczne, powstające w wyniku pracy urządzeń nieliniowych. Pomiary były przeprowadzane w stacji transformatorowej, na kształt napięcia miały wpływ wszystkie odbiorniki nieliniowe zainstalowane w Zakładzie, zasilane przez tę stację. W artykule wyznaczono wartości współczynników *THD* prądu oraz napięcia i odniesiono je do wartości określonych stosownymi normami.

Podczas badań dokonano zmian przepływu na pompie wody czystej, która była odbiornikiem nieliniowym o największej mocy w zakładzie (200 kW). Pompa ta pompowała wodę do wodociągu miejskiego, była sterowana poprzez przełącznik częstotliwości z falownikiem PWM. Jednocześnie w czasie badań pomiarowych pracowały również inne odbiorniki o łącznej mocy ok. 600 kW (liniowe i nieliniowe), były to między innymi pompa przevalowa o mocy 132 kW, generator ozonu o mocy 96 kW, dwie pompy wody surowej o mocy 37 kW każda. Celem pomiarów było sprawdzenie, czy wzrost wydajności pompy wody czystej powoduje zwiększenie wartości harmonicznych prądu oraz napięcia i wzrost wartości *THD* prądu i napięcia w stacji transformatorowej po pierwotnej stronie transformatora.



Rys. 21. Przebiegi prądów dla przepływu 514 m³/h (a) oraz spektrum harmonicznych prądu dla przepływów 514 m³/h (b) oraz 756 m³/h (c). Faza L1 - kolor niebieski, faza L2 - kolor zielony, faza L3 - kolor brązowy

Pomiary wykonywano dla kilku różnych wartości przepływu, zaczynając od 514 m³/h, kończąc na przepływie 756 m³/h - co odpowiada ponad 3-krotnemu wzrostowi mocy pompy wody czystej. Prąd płynący w sieci dla każdego z przepływów miał charakter odkształcony (rys. 21a) i zwiększenie wielkości przepływu (mocy pompy) w niewielkim stopniu wpływało na zmianę jego odkształcenia (rys. 21b, 21c). Zaś współczynnik odkształcenia napięcia THD_U wzrósł z 0,61% do 0,73%, zmiana jest tak mała, iż trudno stwierdzić czy spowodowane to było czynnikami zewnętrznymi czy wzrostem mocy pompy.

Ad [8] Anna Koziorowska, Kazimierz Kuryło, Jacek Bartman, 2010, Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa, Przegląd Elektrotechniczny, vol 86, no. 6, pp. 279-284

W artykule przedstawiono wyniki badań pomiarowych napięcia i prądu pobieranego przez system napędowy kopalni kruszywa. Badania przeprowadzono dla trzech stanów pracy urządzeń zainstalowanych w kopalni, przeanalizowano wpływ nieliniowych odbiorników na kształt prądu i napięcia zasilania. Pomiary zrealizowano w dwóch punktach: w rozdzielni głównej na szynach zasilających, po stronie niskiego napięcia oraz na zaciskach wejściowych przekształtnika AC/AC.

W artykule opisano trzy stany pracy zakładu:

- stan wyłączenia - wszystkie odbiorniki wyłączone,
- stan rozruchu zakładu - stopniowe włączanie napędów kruszarki, koparki oraz taśmociągów,
- stan pracy normalnej – pracują wszystkie napędy zainstalowane w kopalni.

Pomiary w rozdzielni głównej na szynach zasilających, po stronie niskiego napięcia wykonane gdy wyłączone były wszystkie maszyny pracujące w kopalni, wskazywały, iż odkształcenie napięcia jest niewielkie, THD_U wynosiło od 1,29% do 1,5%. Podczas rozruchu maszyn płynący przez nie prąd był odkształcony, co spowodowało wzrost odkształcenia napięcia - wartości współczynnika THD_U w każdej fazie zwiększyły się o około 1%. Ustabilizowanie pracy wszystkich urządzeń korzystnie wpłynęło na kształt prądu oraz napięcia. Wraz ze wzrostem prądu obciążenia, zmalało jego odkształcenie i znacznie zmniejszyła się wartość współczynnika THD_I prądu, w porównaniu do jego wartości w stanie rozruchu, w konsekwencji zmalało odkształcenie napięcia.

Niezależne pomiary zostały wykonane na zaciskach przekształtnika zasilającego tylko silnik koparki. Gdy silnik nie pracował współczynnik odkształcenia napięcia THD_U wynosił ok 1% (w każdej fazie), po załączeniu koparki wzrósł do wartości od 2,9% (dla fazy L2) do 3,5% (dla L1). Spowodowane to było silnie odkształconym charakterem prądu płynącego przez silnik pracującej koparki (THD_I od 62% do 70%). W widmie harmonicznych prądów dominowały harmoniczne: piąta, siódma, jedenasta, trzynasta, siedemnasta, dziewiętnasta. Wartości tych harmonicznych przekraczały dopuszczalne przez normę limity i miały decydujący wpływ na wartość współczynnika THD_I prądu.

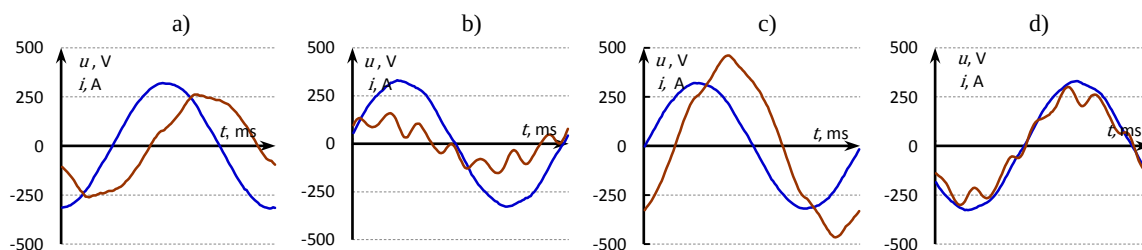
Prąd zwarciovowy dla transformatora zasilającego kopalnię wynosił $I_z = 13,7$ kA. Zmierzony maksymalny prąd obciążenia był równy $I = 315$ A. Z normy IEEE 519-92 odczytano dopuszczalne limity dla nieparzystych harmoniczných prądu - były one przekraczane w stanie rozruchu, zaś na wejściu przekształtnika również podczas normalnej pracy.

Płynące przez przekształtnik odkształcone prądy powodowały odkształcenie napięcia. Jeżeli moc odbiorników nieliniowych była niewielka w porównaniu do mocy odbiorników o charakterze liniowym, nie powodowały one znaczącego odkształcenia napięcia zasilającego. Naruszenie tej zasady powoduje wzrost odkształcenia prądu oraz napięcia.

Ad [9] Anna Kozirowska, Jacek Bartman, 2014, The influence of reactive power compensation on the content of higher harmonics in the voltage and current waveforms, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 90, no. 1, pp. 136-140

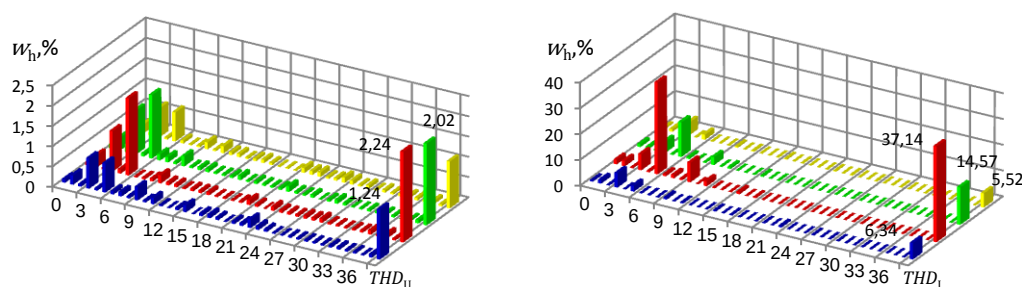
W pracy przedstawiono ocenę wpływu kompensacji mocy biernej na odkształcenie przebiegów prądu i napięcia. Pomiary przeprowadzono w kopalni kruszywa zasilanej z dedykowanego transformatora 15/0,4 kV. W zakładzie pracowało cztery zespoły napędowe z przemiennikami częstotliwości – trzy z falownikami o sterowaniu wektorowym i jeden o sterowaniu skalarnym. Do każdego z układów zastosowano wejściowy filtr zakłóceń w celu spełnienia wymagań dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej. Analizie poddano sygnały prądu oraz napięcia w kontekście zawartości wyższych harmoniczných, wyznaczono wartość współczynników THD_I oraz THD_U

Pomiary wykonano dla czterech różnych stanów pracy zakładu: przy włączonych i wyłączonych bateriach kondensatorów kompensacyjnych podczas biegu jałowego oraz przy włączonych i wyłączonych bateriach kondensatorów podczas pracy normalnej (z obciążeniem). Na podstawie analizy mocy stwierdzono, iż zakład pobierał głównie moc bierną indukcyjną, udział mocy czynnej był ponad dwukrotnie niższy.



Rys. 22. Przebiegi napięcia (kolor niebieski) i prądu (kolor brązowy) fazy L1: a) bieg jałowy z wyłączoną baterią kondensatorów, b) bieg jałowy z włączoną baterią kondensatorów, c) praca pod obciążeniem z wyłączoną baterią kondensatorów, d) praca pod obciążeniem z włączoną baterią kondensatorów

Badania pokazały, iż załączenie kompensacji spowodowało spadek wartości prądu (porównaj rys. 22a z 22b oraz 22c z 22d) i w konsekwencji zmniejszenie poboru mocy pozornej, co skutkowało poprawą współczynnika mocy. Jednak w analizowanym przypadku po załączeniu baterii kondensatorów nastąpił wzrost odkształcenia sygnałów prądowych oraz w konsekwencji napięciowych (rys.23), zarówno dla biegu jałowego jak i dla pracy pod obciążeniem. Oznacza to, że kompensacja wpłynęła negatywnie na jakość energii – było to szczególnie widoczne podczas pracy w stanie jałowym. Wzrost odkształcenia sygnałów był efektem niewłaściwego doboru urządzeń kompensacyjnych, z powodu zastosowania do opisu składowych mocy niewłaściwej teorii. Oznacza to, iż kompensacja mocy biernej może wpływać na odkształcenie napięcia.

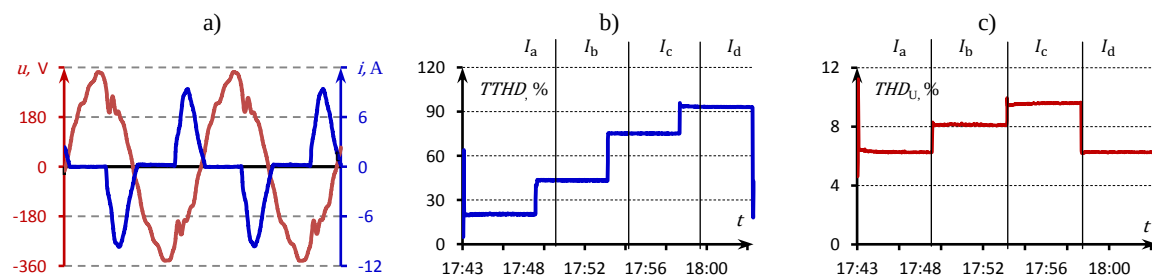


Rys. 23. Widmo harmonicznych napięcia (a) oraz prądu (b) podczas pracy kopalni kruszywa. Kolor niebieski praca jałowa bez kompensacji, kolor czerwony praca jałowa z kompensacją, kolor zielony praca normalna bez kompensacji, kolor żółty praca normalna z kompensacją

Ad [10] Jacek Bartman, Dariusz Sobczyński, 2018, Analysis of the influence of selected non-linear devices on the waveform of supply voltage, ITM Web Conferences, vol. 21, 2018, Computing in Science and Technology (CST 2018), doi.org/10.1051/itmconf/20182100019

W pracy przedstawiono badania dotyczące oddziaływania wybranych urządzeń nieliniowych na kształt napięcia zasilającego. Oceniono w jaki sposób odkształcenie prądu wyrażone przez $TTHD$ oraz wartość skuteczną prądu I wpływają na odkształcenie napięcia reprezentowane przez THD_U . W tym celu przeprowadzono badania wykorzystując do zasilania odbiorników generator indukcyjny o mocy znamionowej 12 kW i napięciu znamionowym 230 V. Przebadano jak, na napięcie zasilania wpływa praca odkurzacza, zestawu lamp LED oraz silnika prądu stałego.

Badanie odkształcenia prądów i napięć oraz oddziaływania odkurzacza o mocy znamionowej 1950 W, wykonano dla czterech różnych wartości siły ssącej. Podczas badań prąd odbiornika miał charakter odkształcony, stwierdzono oddziaływanie urządzenia na źródło zasilania (rys. 24). Spadek mocy odkurzacza powodował wzrost odkształcenia prądu, który oddziałując na źródło powodował początkowo wzrost odkształcenia napięcia. Jednak w końcowej fazie pomimo wzrostu odkształcenia prądu odkształcenie napięcia zmalało (rys.24c).

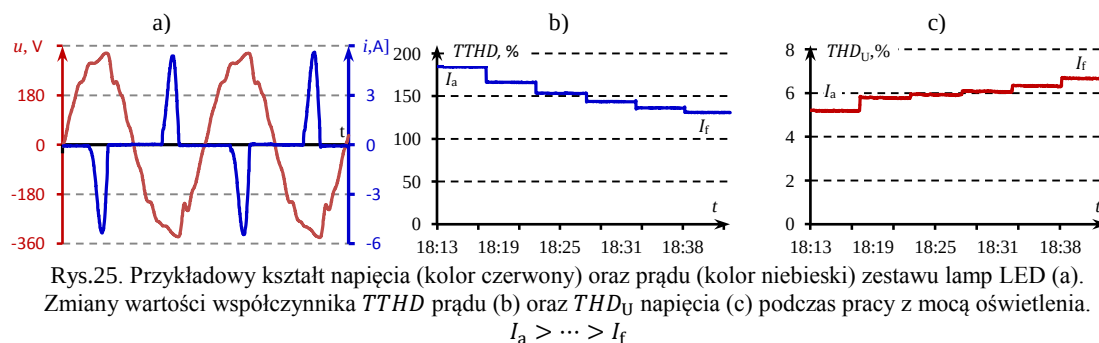


Rys.24. Przykładowy kształt napięcia (kolor czerwony) oraz prądu (kolor niebieski) odkurzacza (a). Zmiany wartości współczynnika $TTHD$ prądu (b) oraz THD_U napięcia (c) podczas pracy z różną siłą ssącą. $I_a > I_b > I_c > I_d$

Poddany badaniom zestaw lamp LED składał się z 6 reflektorów LED o mocy 50W każdy. Badano odkształcenie prądu i napięcia stopniowo włączając kolejne reflektory. Zwiększanie mocy zestawu powodowało zmniejszanie odkształcenia prądu oraz zwiększenie odkształcenia napięcia (rys. 25). Wyniki badań wskazywały, iż odbiornik wpływa na źródło zasilania.

Silnik prądu stałego o mocy znamionowej $P=1,5$ kW przebadano dla trzech różnych prędkości obrotowych. Prąd "pobierany" przez silnik był odkształcony, zaobserwowano, iż zniekształcenie

napięcia rośnie wraz ze wzrostem wartości skutecznej prądu, jednocześnie spada odkształcenie prądu.



Przedstawione w pracy badania wykazały, iż w przypadku zastosowanego elastycznego źródła zasilania praca odbiorników powodowała kilkuprocentowe odkształcenie jego napięcia. Zaobserwowano, iż wzrost odkształcenia prądu nie koniecznie powoduje wzrost odkształcenia napięcia. Wskazuje to, iż stopień odkształcenia napięcia zasilającego, w wyniku pracy urządzeń nieliniowych, zależy zarówno od wartości skutecznej pobieranego prądu (I) jak i od stopnia jego odkształcenia wyrażonego przez współczynnik $TTHD$.

Ad [11] Tadeusz Kwater, Jacek Bartman, 2017, Application of artificial neural networks in non-invasive identification of electric energy receivers, 2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Koscielisko, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/PAEE.2017.8008982. MNiSW 15.

Artykuł dotyczy zagadnień związanych z systemami wspomagającymi oszczędne gospodarowanie energią elektryczną. Zaproponowano system doradczo-monitorujący wyposażony w sztuczną inteligencję do nieinwazyjnej identyfikacji on-line urządzeń elektrycznych.

Przeprowadzono badania dla podstawowego elementu systemu jakim jest moduł klasyfikatora. Jako dane opisujące obiekty wykorzystano wielkości elektryczne uzyskane z pomiarów analizatorem Elspec BlackBox 4500 (wartość skuteczna prądu, współczynnik zawartości harmonicznych, współczynnik mocy, moc czynna, współczynniki zawartości nieparzystych harmonicznych od 3 do 15). Dane reprezentujące poszczególne stany urządzeń rozróżniano jako kolejne obiekty (pseudourządzenia), a ich oznaczenia wynikały z przyjętych sposobów kodowania. W badaniach przyjęto trzy rodzaje kodów tj.: "kod binarny", "kod jeden z N" oraz "kod naturalny". Klasyfikatory wykorzystane do identyfikacji urządzeń elektrycznych i ich stanu pracy zaimplementowano w środowisku MatLab. Zbudowano 12 klasyfikatorów różniących się liczbą neuronów w warstwie ukrytej oraz w warstwie wyjściowej. Każdy z nich poddano uczeniu trzema metodami: Levenberga-Marquardta (LM), Resilient Backpropagation (RProp) oraz szybkiej wstecznej propagacji błędów (GDX). Testując klasyfikatory na wydzielonym zbiorze danych uzyskano efektywność identyfikacji od 68%-91%. Najwyższą efektywność uzyskano dla klasyfikatora uczonego metodą RProp, wyposażonego w 30 neuronów w warstwie ukrytej, wykorzystującego opis obiektów w postaci tzw. kodu binarnego.

Uzyskane rezultaty wskazują, iż jest możliwa identyfikacja urządzeń elektrycznych przy pomocy klasyfikatorów neuronowych wykorzystujących pomiary prądów z uwzględnieniem parametrów odkształcenia (THD , wybrane harmoniczne).

4.3.3. Podsumowanie

Opisany cykl publikacji zawiera kompleksową analizę odkształcenia napięć i prądów w kontekście kompensacji mocy oraz oceny wpływu odkształcenia wymienionych wielkości na składowe mocy. Zawarto w nim również elementy modelowania matematycznego układów zawierających urządzenia nieliniowe, będące przyczyną odkształceń prądów oraz napięć, a także wskazano możliwości wykorzystania analiz odkształceń do identyfikacji pracujących urządzeń elektrycznych w celu poprawy energochłonności.

Nieliniowość odbiornika energii elektrycznej powoduje odkształcenie prądu, które może prowadzić do odkształcenia napięcia zasilającego. Badania wykazały, iż efekt oddziaływania odbiornika na źródło zasilania zależy od stosunku pomiędzy mocą odbiornika i mocą zwarciovą źródła oraz od wielkości odkształcenia prądu. Przy dużej mocy źródła wobec mocy odbiornika zniekształcenia napięcia są niezauważalne, zaś przy wartościach mocy zbliżonego rzędu są one wyraźnie widoczne. Wraz ze wzrostem wpływu odbiornika energii na źródło zasilania (wraz ze wzrostem odkształcenia napięcia) odkształcenie prądu odbiornika może ulec zmniejszeniu. Zmniejszenie odkształcenia prądu oraz niewielkie zwiększenie się odkształcenia napięcia powodują zmianę składu pobieranej mocy pozornej – maleje udział składowych niepożądanych (szkodliwych) i w efekcie następuje poprawa współczynnika mocy.

Nieliniowość odbiornika nie jest cechą, którą można zidentyfikować, monitorując tylko współczynniki umożliwiające ocenę odkształcenia prądu, gdyż, co zauważono w rozważaniach przedstawionych w pracy [1], wraz ze wzrostem oddziaływania odbiornika na źródło, zwrotnie może następować poprawa kształtu prądu. Ocena nieliniowości odbiornika wymaga analizy zarówno pobieranego prądu, jak i napięcia zasilającego.

Badania wykazały, iż moce czynne przenoszone przez wyższe harmoniczne mogą być zarówno dodatnie, jak i ujemne. Jeżeli moc jest ujemna, wówczas oznacza to, iż odbiornik jest lokalnym źródłem harmonicznych. Ta obserwacja jest spójna z teorią składowych fizycznych prądu, w której Czarnecki postuluje wyodrębnienie prądu generowanego jako składowej prądu odbiornika złożonej z harmonicznych powstałych w odbiorniku i związanych z jego nieliniowością lub zmianami jego parametrów, obejmującymi również zmianę okresu napięcia zasilającego. Podobnie jak pojedyncze harmoniczne, również suma mocy wyższych harmonicznych może być dodatnia lub ujemna.

Sugerowana przez normę IEEE 1459–2010 dekompozycja mocy podkreśla znaczenie podstawowych harmonicznych napięcia i prądu, niejako uwypuklając, iż tylko te składowe są pożądane. Podejście takie czyni teorię bardzo praktyczną od strony obliczeniowej, jednak zupełnie nie odnosi jej do zjawisk fizycznych. Nieco inną opinię można wyrazić o teorii Czarneckiego, która uwidacznia zjawiska fizyczne, jednak jest niewygodna z punktu widzenia obliczeń. Analizy prowadzone zgodnie z normą pozwoliły zauważyć, iż dominujący udział w mocach niepożądanych ma moc wynikająca z odkształcenia prądu.

Przedstawione w [1] badania układów z odkształconymi przebiegami napięć i prądów odbiegają od tradycyjnego ujęcia tego zagadnienia. Główny akcent został położony na wzajemne zależności pomiędzy odkształceniami napięcia, prądu oraz obserwowanymi jako ich efekt zmianami w charakterze mocy. Monografia [1] zawiera liczne przykłady obliczeniowe dla teoretycznych i praktycznych wariantów, w których zaprezentowano problematykę ważną zarówno od strony naukowej, jak i praktycznej. Przedstawione badania i wnioski są oryginalnymi wynikami pracy autora.

4.3.4. Określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny

Wykaz dokonań autora przedstawionych w cyklu publikacji, który stanowi osiągnięcie naukowe i wpisuje się w rozwój dyscypliny:

- Wskazanie przyczyn braku spójnej i akceptowalnej teorii mocy na bazie przeprowadzonej analizy wybranych teorii w kontekście eliminacji odkształceń kompensacji poszczególnych składowych prądu oraz natury odbiornika i zasilania [1].
- Sformułowanie warunków przetwarzania przebiegów quasi-okresowych w odniesieniu do parametrów determinujących technikę pomiaru z wykorzystaniem aparatury cyfrowej. [2, 3, 4].
- Opracowanie heterogenicznego modelu matematycznego złożonego układu rzeczywistego zawierającego nieliniowe urządzenia elektryczne [5, 6].
- Określenie oddziaływania wybranych nieliniowych odbiorników energii na źródło zasilania w kontekście odkształcenia napięcia źródłowego oraz struktury pobieranej mocy. [1, 7, 8, 9, 10].
- Zaprojektowanie i implementacja metod sztucznej inteligencji (Sztuczne Sieci Neuronowe) do identyfikacji on-line nieliniowych odbiorników energii, w celu poprawy energochłonności końcowych odbiorców energii [11].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Prowadzoną działalność naukowo-badawczą poza obszarem wskazanym jako „osiągnięcie naukowe”, można podzielić na dwie grupy tematyczne:

5.1. Badanie metod uczenia oraz wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w zadaniach identyfikacji, klasyfikacji i prognozowania.

5.2. Projektowanie systemów bazodanowych.

5.1. Badanie metod uczenia oraz wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w zadaniach identyfikacji, klasyfikacji i prognozowania.

W początkowym etapie badania skoncentrowane były na analizie działania oraz opisu sztucznych sieci neuronowych przy pomocy języka programowania. W ich efekcie wyłoniły się dwa główne nurty badań: jeden ukierunkowany na analizę procesu (algorytmów) uczenia sztucznych sieci neuronowych, drugi ukierunkowany na zastosowania sieci neuronowych.

W ramach nurtu pierwszego, badano efektywność, szybkość uczenia sieci, czułość na parametry uczenia, możliwości wykorzystania do uczenia SSN modeli matematycznych [8]. Wyselekcjonowano metody, które charakteryzowały się dużą szybkością uczenia (metoda Levenberga-Marquardta, gradientów sprzężonych) oraz dobrą stabilnością uczenia (metoda wstecznej propagacji błędów z momentum i adaptacyjnym doбором współczynnika uczenia). Następnie badano wpływ architektury sieci na szybkość uczenia oraz efektywność pracy, przeanalizowano efekt tzw. przeuczenia sieci neuronowej. Kolejne badania dotyczyły wpływu doboru zbioru uczącego na efektywność uczenia oraz pracy sieci neuronowej. **Najważniejszym efektem badań było opracowanie nowego autorskiego algorytmu uczenia sztucznych neuronów (tzw. reguły PID)** [6, 7]. Reguła PID odwołuje się do ogólnej zasady uczenia

sztucznych sieci neuronowych nakazującej, aby korekta wag była proporcjonalna do sygnału uczącego r oraz wektora wejściowego $\mathbf{x}$. Zaproponowano, aby sygnał uczący uwzględniał:

- błąd popełniany przez neuron,
- szybkość i kierunek zmian tegoż błędu,
- „historię” uczenia.

Prowadzi to do następującej zależności opisującej korektę wag neuronu

$$\Delta \mathbf{w} = \eta \left(\varepsilon(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^n \varepsilon(k) + T_d (\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)) \right) \mathbf{x}$$

gdzie: η, T_i, T_d - parametry uczenia,

$\varepsilon(k)$ - błąd popełniany przez neuron.

Drugi nurt badań skoncentrowany był na zastosowaniach sztucznych sieci neuronowych w zadaniach identyfikacji, prognozowania oraz modelowania urządzeń. Identyfikację i klasyfikację prowadzona była na potrzeby:

- diagnostyki drgań silnika indukcyjnego [1],
- detekcji uszkodzeń jablek [2, 4, 10],
- nieinwazyjnej identyfikacji odbiorników energii elektrycznej [14],
- klasyfikacji białek [11].

Na potrzeby prognozowania sieć neuronową wykorzystano do:

- przewidywania wyników meczy piłkarskich [12].
- jako model sieć wykorzystano do modelowania wodociągu na podstawie pomiarów [5].

Najważniejszym efektem badań nad wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych było zaprojektowanie algorytmu do detekcji uszkodzeń jablek (szacunkowy wkład habilitanta ok. 50%).

W wyniku prowadzonych badań nad sieciami neuronowymi autor wniosku samodzielnie zaprojektował i zaimplementował w języku Matlab takie sieci jak: Multilayer Perceptron, Counter Propagation, sieci Kohonena.

Wybrane artykuły dokumentujące osiągnięcie

- [1] Tchaban V., Twarog B., Tchaban A., **Bartman J.**, 2003, The diagnostic of vibrations of induction motor by ANN - Mediterranean Conference on Modeling and Simulation, Reggio Calabria, Italy, on CD.
- [2] Kwater T., **Bartman J.**, Twaróg B., 2004, Koncepcja automatyzacji procesu identyfikacji pewnych defektów jablek w oparciu o cyfrową analizę ich obrazów. 9-th International Modelling School of AMSE – UAPL, Alushta, Ukraine pp. 121-124
- [3] Twarog B., Pekala R., **Bartman J.**, Gomolka Z., 2007, The changes of air gap in inductive engines as vibration indicator aided by mathematical model and artificial neural network, Discrete and Continuous Dynamical Systems, pp. 1005-1012.
- [4] Kwater T., **Bartman J.**, Pękala R., 2007, Artificial neural networks in detection of apples image, Proceedings of the 10-th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks, pp. 376-379
- [5] **Bartman J.**, Koziorowska A., 2008, Model systemu „zespół pompowy – przewód” ze sterowanym układem napędowym na potrzeby diagnostyczne, Diagnostyka, vol. 2-46, pp.61-66.
- [6] **Bartman J.**, 2009, Idea nowej reguły uczenia sztucznych neuronów, Technical News 1(29)/ 2(30), pp. 137-140.
- [7] **Bartman J.**, 2009, Reguła PID uczenia sztucznych neuronów, Metody Informatyki Stosowanej, nr 3/2009 pp. 5-19.
- [8] **Bartman J.**, Koziorowska A., Czaban W., 2010, Mathematical modeling and artificial neuron networks cooperation. W: The Symbiosis of Engineering and Computer Science, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, pp. 205-224;

- [9] Gomółka Z., Twaróg B., **Bartman J.**, 2011, Improvement of image processing by using homogeneous neural networks with fractional derivatives theorem, *Dynamical Systems, Differential Equations and Applications*, vol 1, pp. 505-514.
- [10] Kwater T., **Bartman J.**, Atamanyuk I., Sidenko E., 2011, Diagnosis of apples by automatic classification of objects. W: *Monographs In Applied Informatics, Computing in Science and Technology*, pp. 97-110.
- [11] **Bartman J.**, 2013, Wpływ opisu danych na efektywność uczenia oraz pracy sztucznej sieci neuronowej na przykładzie identyfikacji białek, *Edukacja – Technika - Informatyka*, vol. 4, część 2, pp. 358-365.
- [12] **Bartman J.**, Bajda K., 2014, Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania wyników meczów piłkarskich *Edukacja – Technika - Informatyka*, vol. 5, część 2, pp. 425-431.
- [13] **Bartman J.**, Gomółka Z., Twaróg B., 2015, ANN training – the analysis of the selected procedures in Matlab environment. W: *Computing in Science and Technology*, pp. 88-101.
- [14] Kwater T., **Bartman J.**, 2017, Application of artificial neural networks in non-invasive identification of electric energy receivers, 2017 *Progress In Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko, pp. 1-6. doi: 10.1109/PAEE.2017.8008982.

5.3. Projektowanie systemów bazodanowych.

Badania z zakresu projektowania baz danych miały charakter badawczo-wdrożeniowy, obejmowały one przygotowanie projektu systemu informatycznego oraz zaimplementowanie go w języku programowania dedykowanym do przygotowywania baz danych.

Projektowanie relacyjnych baz danych wymaga wykonania pewnych operacji, które pozwolą w sposób jak najlepszy odwzorować rzeczywistość przy pomocy sformalizowanego zapisu informatycznego i jednocześnie zapewnić otwartość systemu na ewentualne zmiany. Dlatego też zalecane jest wykonanie następujących etapów projektowania: sformułowanie problemu, określenie zadań jakie powinien spełniać system, określenie tablic i kluczy, określenie relacji pomiędzy tablicami, normalizacja tablic, określenie zasad integralności. Sposób realizacji każdego z tych etapów zależy od specyfiki projektowanego systemu oraz oczekiwań co do jego funkcjonalności. Szczególnie ważna jest normalizacja, pozwalająca uniknąć anomalii oraz właściwe określenie zasad integralności. W projektowanych systemach na te punkty zwrócono szczególną uwagę. Do najważniejszych osiągnięć prac należy zaliczyć zaprojektowane i wdrożone systemy bazodanowe:

- systemy płacowe,
- system finansowo-księgowy,
- system nalicznia amortyzacji,
- system rozlicznia umów-zleceń,
- systemy rozliczania pożyczek.

Wybrane artykuły dokumentujące osiągnięcie

- [1] **Bartman J.**, Kwater T., 2001, Projektowanie relacyjnych baz danych na przykładzie systemu rozliczania umów zleceń, *Zeszyty Naukowe, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie*, nr 2, pp. 83-91.
- [2] Bartman B., **Bartman J.**, 2001, Informatyka w Ekonomii, I Konferencja „Edukacja Informatyczna”, Czechy, pp. 74-76.
- [3] **Bartman J.**, Kwater T., Twaróg B., 2001, Realizacja systemów informatycznych w oparciu o teorię relacyjnych baz danych, *Automatyka, Pomiary i Sterowanie*, pp. 130-133.
- [4] **Bartman J.**, Bartman B. 2002, Zarys koncepcji informatyzacji Uniwersytetu Rzeszowskiego w aspekcie korzyści ekonomicznych, 7-th International Modelling School of AMSE-UAPL. pp. 63-66.

6. Wskaźniki bibliometryczne

- Liczba publikacji w czasopismach z JCR – 7;
- Impact Factor – 4,825
- Liczba pozycji w bazie Web of Science – 17;
- Indeks Hirscha wg WoS – 5;
- Liczba pozycji w bazie Scopus – 19;
- Indeks Hirscha wg Scopus – 6;
- Liczba pozycji w bazie Google Scholar – 57;
- Indeks Hirscha wg Google Scholar – 7;