

Autoreferat

dr inż. Andrzej Stefan Wetula

1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika – luty 2009
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Tytuł rozprawy doktorskiej: *Miary wahania napięcia w sieci elektroenergetycznej wyznaczane z wykorzystaniem transformacji Hilberta.*
Promotor: dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH
Recenzent zewnętrzny: dr hab. inż. Wiesław Miczulski, prof. UZ
Recenzent wewnętrzny: prof. dr hab. inż. Jan Rusek
- Magister inżynier – czerwiec 2002
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
kierunek Elektrotechnika, specjalność Automatyka i Metrologia
Promotor: dr inż. Andrzej Bień

2. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych

- Adiunkt: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Metrologii i Elektroniki, od września 2012 do chwili obecnej
- Adiunkt: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Metrologii i Elektroniki, od grudnia 2009 do sierpnia 2012
- Asystent: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Metrologii, od października 2002 do grudnia 2009

3. Wskazanie osiągnięcia, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

Podstawę wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego stanowi monografia wraz z cyklem powiązanych tematycznie prac oraz cyklem wynalazków. Całość jest zatytułowana „*Pomiary napięć do celów badania jakości energii elektrycznej*”:

1. **Andrzej Wetula**: „*Systemy do bezkontaktowych pomiarów średnich i wysokich napięć w elektroenergetyce*”. Monografia, Wydawnictwa AGH, Kraków 2020. ISBN 978-83-66364-79-0. Praca samodzielna.
2. Dariusz Borkowski, **Andrzej Wetula**, Andrzej Bień: „*Contactless Measurement of Substation Busbars Voltages and Waveforms Reconstruction Using Electric Field Sensors and Artificial Neural Network*”. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 3, May 2015. **JCR**, IF 8,267, MNiSW: 200, liczba cytowań: 24. Udział wnioskodawcy 33%, obejmujący: przedstawienie koncepcji, ideę zastosowania sieci neuronowych do rekonstrukcji przebiegów napięć, skonstruowanie czujników pola do wykorzystania w eksperymencie, budowę stanowiska laboratoryjnego, przygotowanie i prowadzenie eksperymentu, treść publikacji.
3. **Andrzej Wetula**, Andrzej Bień, Mrunal Parekh: „*New Sensor for Medium- and High-Voltage Measurement*”. MDPI Energies 2021, 14, 4654. **JCR**, IF 3,288, MNiSW: 140. Udział wnioskodawcy 33%, obejmujący: przedstawienie koncepcji, opracowanie metodologii eksperymentu, przygotowanie sprzętu i oprogramowania do eksperymentu, przeprowadzenie eksperymentu, analizę danych i przygotowanie wstępnej wersji artykułu.
4. Andrzej Bień, Dariusz Borkowski, **Andrzej Wetula**: „*Sposób bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej oraz układ do bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej*”. Patent krajowy P.402134, zgłoszony 19.12.2012, przyznany 14.11.2017. Udział wnioskodawcy 33%, obejmujący: Przedstawienie koncepcji, idea zastosowania sieci neuronowych do rekonstrukcji przebiegów napięć, opracowanie treści patentu, prace edytorskie nad tekstem wniosku.
5. Andrzej Bień, Dariusz Borkowski, **Andrzej Wetula**: „*Sposób kalibracji oraz układ kalibracji układu przetwarzania sygnałów w układzie do bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej*”. Patent krajowy P.420374, zgłoszony 19.12.2012, przyznany 24.11.2017. Udział wnioskodawcy 33%, obejmujący: przedstawienie koncepcji, opracowanie wynalazku, prace edytorskie nad tekstem wniosku.
6. Jerzy Nabielec, **Andrzej Wetula**: „*Sposób i układ do laboratoryjnego pomiaru wysokiego napięcia*”. Patent krajowy P.409067, zgłoszony 01.08.2014, udzielony 22.11.2016. Udział wnioskodawcy 50%, obejmujący przedstawienie koncepcji, opracowanie treści patentu, prace edytorskie nad treścią wniosku patentowego, konstrukcja i badanie prototypu wynalazku do celu weryfikacji koncepcji. Patent wdrożony do produktu.
7. Jerzy Nabielec, **Andrzej Wetula**: „*Sposób i układ do technicznego pomiaru wysokiego napięcia*”. Patent krajowy P.409066, zgłoszony 01.08.2014, udzielony 22.11.2016. Udział wnioskodawcy 50%, obejmujący przedstawienie koncepcji, opracowanie treści patentu, prace edytorskie nad treścią wniosku patentowego, konstrukcja i badanie prototypu wynalazku do celu weryfikacji koncepcji.

Kopie wszystkich publikacji zostały załączone do wniosku jako załącznik numer 5, a informacje o udziałach poszczególnych autorów (w tym wnioskodawcy), wraz z oświadczeniami współautorów stanowią załącznik numer 6.

4. Opis osiągnięcia

Motywy przewodnim prezentowanego osiągnięcia jest opracowanie nowych metod pomiaru napięć, w szczególności do wykorzystania w badaniu jakości energii elektrycznej. Z takim celem związane są szczególne wymagania dotyczące właściwości pomiarowych opracowanego przetwornika, przyrządu lub systemu pomiarowego.

Analizy jakości energii elektrycznej koncentrują się przede wszystkim na analizie sygnałów napięć jako powiązanych ze stroną źródła (dostawcy) energii i tym samym niosącą więcej informacji o jego pracy. Systemy do analizy jakości energii elektrycznej powinny spełniać złożone wymagania, zazwyczaj nieosiągalne dla powszechnie stosowanych przekładników i dzielników pojemnościowych. System pomiaru napięcia do celów jakości energii elektrycznej powinien jednocześnie cechować się:

- Pasmem przetwarzania obejmującym przynajmniej 40, a w nowszych systemach nawet do 100 harmonicznych. Oznacza to pasmo przenoszenia na poziomie 6 kiloherców (dla systemów 60 Hz). W przypadku systemów cyfrowych częstotliwość próbkowania powinna teoretycznie wynieść przynajmniej 12 kiloherców, jednak rejestratory jakości energii często próbują z częstotliwością ponad 20 kiloherców.
- Możliwością przenoszenia subharmonicznych o częstotliwości sięgającej przynajmniej kilkunastu herców. Wynika to z konieczności analizy uciążliwości migotania związanej z modulacją amplitudową i fazową podstawowej harmonicznej.
- Niepewnością względną pomiaru wartości skutecznej na poziomie 0,1%. Ze względu na uśredniający charakter wartości skutecznej, niepewność pomiaru wartości chwilowych nie przekłada się bezpośrednio na tę wartość, jednak oczekuje się, że będzie możliwie najmniejsza.
- Możliwie długim czasem bez konieczności rekaliibracji, która musi być prowadzona przez specjalizowane i drogie laboratoria.

Poza powyższymi właściwościami często oczekuje się, że system do pomiarów napięć do celów badania jakości energii elektrycznej będzie przenośny. Ma to na celu umożliwienie prowadzenia pomiarów doraźnych, np. w celu detekcji źródeł zaburzeń. Dodatkowo przenośność systemu pozwala obniżyć koszty związane z zakupem lub wynajmem drogiej aparatury, przez zastosowanie jej w wielu punktach pomiaru. Z punktu widzenia pomiarów średnich i wysokich napięć oznacza to jednak, że albo konieczna jest praca z zastanymi w miejscu pomiaru przekładnikami, albo opracowanie przenośnej aparatury takich napięć.

Na podstawie analizy powyższych wymagań, podjąłem prace badawcze w następujących kierunkach:

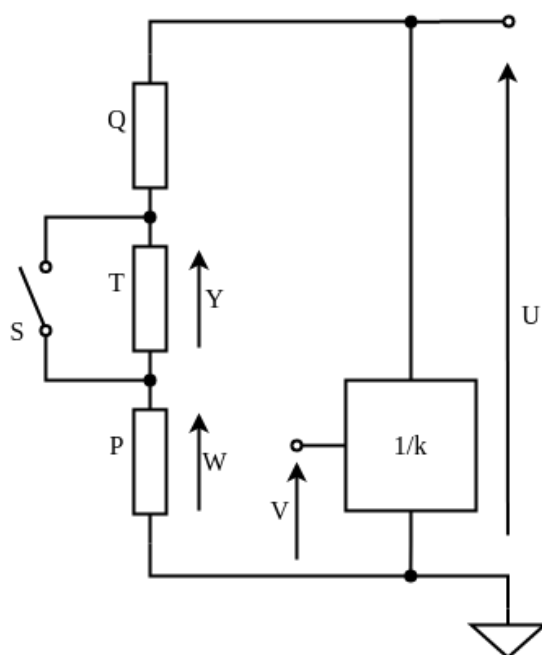
- Opracowanie aparatury do pomiaru średnich i wysokich napięć z autokalibracją, w celu wydłużenia okresów między kalibracją lub nawet całkowitego uwolnienia od prowadzenia tej procedury.
- Opracowanie bezkontaktowego systemu do pomiaru średnich i wysokich napięć. Prosta instalacja takiego systemu, bez konieczności wyłączania napięcia i stosowania procedur bezpieczeństwa, mogłaby spełnić wymóg przenośności systemu.

4.1. Pomiarowy przetwornik średnich i wysokich napięć z autokalibracją.

Pierwszym kierunkiem badawczym, którym zajmowałem się w ramach przedstawianego osiągnięcia, była kwestia opracowania przetwornika średnich i wysokich napięć z autokalibracją. Prace w tym kierunku były prowadzone przez zespół badawczy w ramach projektu badawczo-rozwojowego zatytułowanego "Pomiarowy dzielnik wysokiego napięcia z autokalibracją" finansowanego z grantu NCBiR, którego byłem kierownikiem. Projekt był prowadzony przez konsorcjum uczelni z przemysłem. Wśród jego efektów znalazły się między innymi referat *Experimental verification of the voltage divider with auto-calibration* oraz patenty krajowe "Sposób i układ do laboratoryjnego pomiaru wysokiego napięcia" i "Sposób i układ do technicznego pomiaru

wysokiego napięcia”. Patenty wchodzą w skład osiągnięcia (nr 6 i 7), przy czym w ramach projektu wdrożono rozwiązanie z patentu przedstawionego pod nr 6. Referat nie wchodzi w skład wniosku z przyczyn formalnych, jednak jego treść zostanie pokrótce przybliżona poniżej, gdyż w mojej opinii stanowi on istotny element mojego dorobku, a przede wszystkim pozwala na przejrzyste przedstawienie koncepcji chronionych wymienionymi wyżej patentami. Referat jest indeksowany przez IEEE Xplore, a mój udział w jego przygotowaniu objął opracowanie przebiegu eksperymentów, projekt i przygotowanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie eksperymentów, analizę wyników oraz wygłoszenie referatu. Referat wymieniony jest w załączniku 4, w punkcie 1.5.2, poz. 12.

Koncepcja dzielnika z autokalibracją wywodzi się z zaprezentowanej w 1936 roku przez von Pfriema metody dwuczujnikowej, zwanej też metodą korekcji „w ciemno”. Metoda ta wykorzystuje porównanie wartości wyjściowych z dwóch czujników o różnych właściwościach dynamicznych do przestrojenia korektora w taki sposób, aby uzyskać (teoretycznie) wierne odtworzenie sygnału wejściowego na wyjściu układu. Metoda ta została oryginalnie opracowana przy założeniu, że czujniki można modelować jako elementy inercyjne pierwszego rzędu, właściwości dynamiczne obu torów pomiarowych są liniowo zależne a właściwości statyczne znane. W toku prowadzonych uprzednio na AGH prac (bez mojego udziału) opracowane zostały warianty algorytmu dla czujników o niezależnych właściwościach dynamicznych, elementów wyższych rzędów, z cyfrowym korektorem, oraz dla układów o nieznanymi właściwościach statycznych. W ostatnim przypadku zarówno właściwości statyczne, jak i dynamiczne są wyznaczane w miejscu i w trakcie pracy systemu pomiarowego. Na tym wariantcie algorytmu zostało oparte przedstawione w artykule rozwiązanie układowe i algorytm pracy dzielnika napięcia z autokalibracją. Należy przy tym zaznaczyć, że rozwiązanie przedstawione w artykule jest jednym z kilkunastu rozwiązań opracowanych w ramach projektu. Jego wybór wynika z faktu, że wnioskodawca wziął czynny udział w opracowaniu, badaniu i udoskonaleniu przedstawianej konstrukcji. Schemat dzielnika przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat opisanywanego dzielnika

Element oznaczony $1/k$ na schemacie jest dowolnym przetwornikiem napięcia, cechującym się przekładnią k . W szczególności może to być zainstalowany wcześniej w miejscu pomiaru przekładnik napięciowy, co pozwala instalować opracowany dzielnik jako rozszerzenie istniejącej infrastruktury. Równolegle do przetwornika $1/k$ podłączona jest gałąź zbudowana z elementów o impedancjach oznaczonych Q , T , P . Przełącznik S pozwala na zwarcie jednego z elementów (w tym przypadku T), a tym samym na sprowadzenie do zera prądu i napięcia tego elementu. Dzielnik wyznacza wartość k

na podstawie napięć zarejestrowanych w dwóch krokach, przy zwartym i otwartym przełączniku S . Gdy S jest zamknięty, zachodzi:

$$V_1 k = W_1 \frac{P+Q}{P} \quad (1)$$

Przy otwartym styczniku S zachodzi:

$$V_2 k = W_2 \frac{P+Q+T}{P} \quad (2)$$

oraz

$$\frac{W_2}{P} = \frac{Y_2}{T} \quad (3)$$

Zakładając, że napięcie wejściowe U było w obu krokach takie samo, można zapisać:

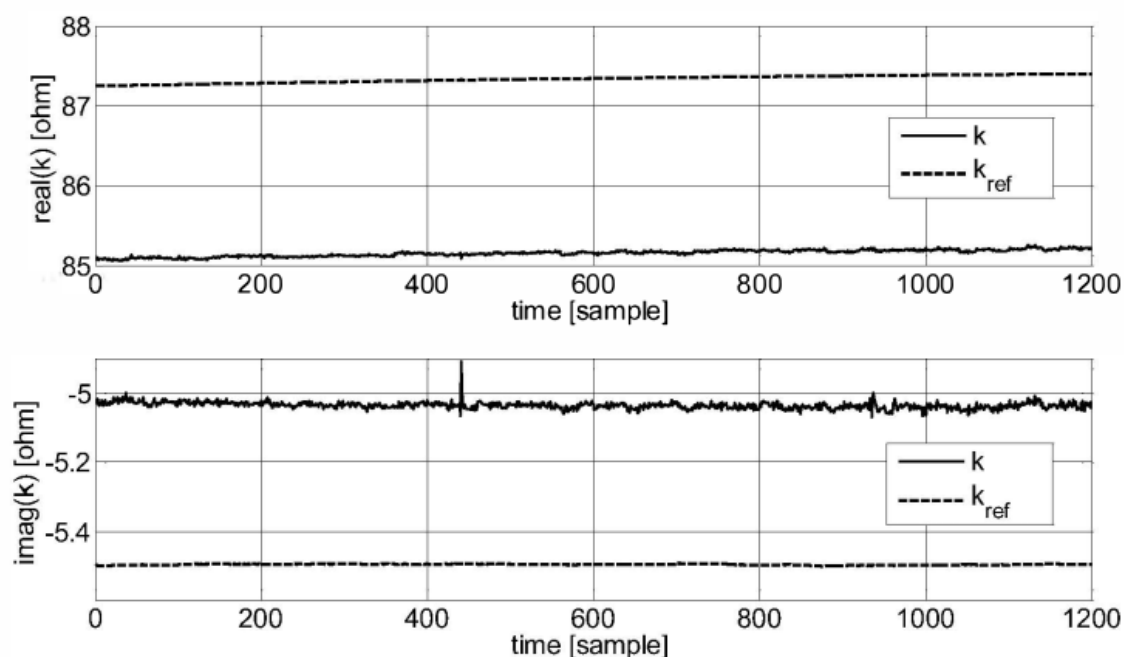
$$k = \frac{W_1 Y_2}{V_2 W_1 - W_2 V_1} \quad (4)$$

a tym samym wyznaczyć przekładnię k na podstawie wyłącznie napięć zmierzonych w obwodzie. Pozwala to uniezależnić się od wartości elementów pasywnych z których zbudowano dzielnik (w tym przetwornika K), których zmienność wskutek starzenia czy zmian warunków środowiskowych jest jedną z głównych przyczyn utraty dokładności przez przetworniki napięcia.

W ramach wspomnianego projektu badawczo-rozwojowego opracowano kilka wariantów konstrukcji dzielnika. Są wśród nich rozwiązanie aktywne ze wzmacniaczami operacyjnymi, rozwiązanie kaskadowe do pracy przy wysokich napięciach czy kilka rozwiązań różniących się sposobem połączenia impedancji w gałęzi o zmiennej strukturze. Ponieważ sposób połączenia zmienia postać równań (1) - (4), jego odpowiedni wybór w połączeniu z charakterem elementów (pojemnościowe, rezystancyjne) pozwala na minimalizację błędów numerycznych na które podstawowa wersja jest dość wrażliwa.

Ze względu na rozwojowy charakter projektu, jego efekty są widoczne przede wszystkim w postaci patentów. Przygotowano jednak również szereg publikacji. Jedną z nich jest referat konferencyjny zatytułowany *Experimental verification of the voltage divider with auto-calibration*, prezentowany przeze mnie na konferencji *XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*.

W referacie przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych dzielnika w konfiguracji przedstawionej na rysunku 1 i opisanej równaniami (1) - (4). Badania przeprowadzono na stanowisku do badań aparatury średniego napięcia w firmie współpracującej z AGH w projekcie. Składało się ono z autotransformatora, transformatora 0.4/15 kV (podnoszącego napięcie) oraz rezystancyjnych dzielników odniesienia o niepewności 0,5 % w paśmie do 5 MHz. Poza napięciem wejściowym, rejestrowano również napięcie na impedancji Q badanego dzielnika. W celu określenia właściwości metrologicznych systemu przeprowadzono szereg rejestracji przebiegów napięć wejściowych i wyjściowych podczas normalnej pracy systemu. Zarejestrowane napięcia następnie analizowano z wykorzystaniem programu Matlab. Określono zmienność przekładni k podczas nagrzewania dzielnika, a także wartości błędów wyznaczenia poszczególnych harmonicznych oraz ich zależność od wartości pasożytniczej pojemności doziemnej dzielnika. Przykładowe zmiany wartości k przedstawiono na rysunku 2.



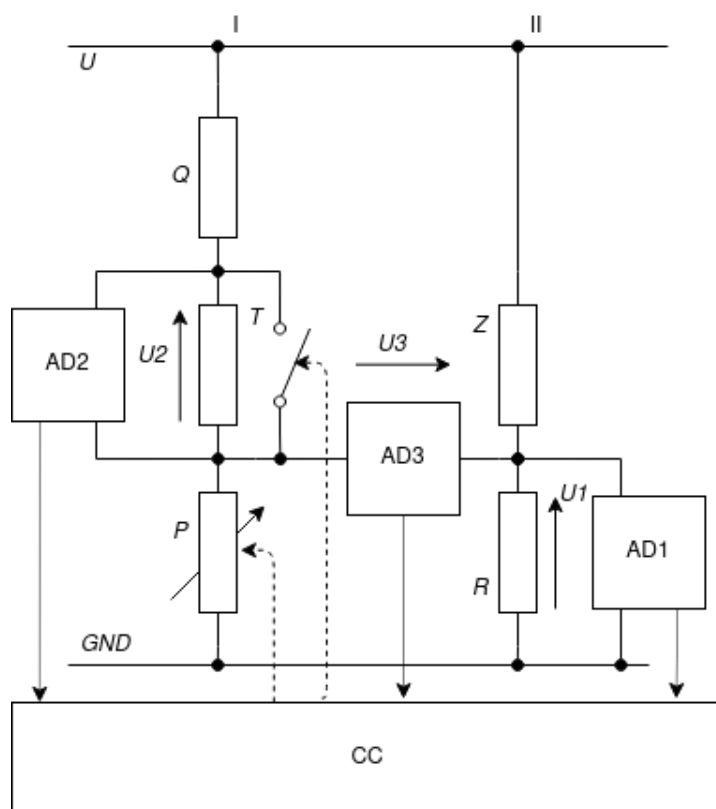
Rys. 2. Wartości przekładni k zarejestrowane podczas eksperymentu

Widać na nim zmianę wartości przekładni wskutek nagrzewania systemu podczas pracy. Występuje też znaczny błąd systematyczny przekładni. Całkowity błąd wektorowy (*total vector error*; *TVE*) dzielnika w badanej konfiguracji wyniósł 18,7%. Jako główną przyczynę stosunkowo wysokich błędów przekładni i całkowitego błędu wektorowego wskazano występowanie w systemie wspomnianej wcześniej pojemności pasożytniczej. Wyniki eksperymentów pozwoliły określić sposób modyfikacji konstrukcji dzielnika. Zastosowanie odpowiednio podłączonych ekranów pozwoliło uzyskać wartości niepewności na poziomie poniżej 1 %, zaprezentowane w oddzielnej publikacji.

4.2. Patent “Sposób i układ do technicznego pomiaru wysokiego napięcia”

Jak wspomniano wcześniej, efekty projektu są widoczne przede wszystkim w postaci patentów. Jestem współautorem dwóch z nich zatytułowanych *Sposób i układ do technicznego pomiaru wysokiego napięcia* oraz *Sposób i układ do laboratoryjnego pomiaru wysokiego napięcia*. Patenty chronią dwa różne rozwiązania dzielnika napięcia z autokalibracją. W pierwszym patencie opisana jest konstrukcja dzielnika o schemacie przedstawionym na rysunku 3. Jest to rozwiązanie podobne do przedstawionego powyżej na rysunku 1.

W przedstawionym układzie w każdym cyklu za pomocą łącznika S sterowanego sygnałem z jednostki sterująco-obliczeniowej CC zwierza się, impedancję pomocniczą T , która jest zainstalowana w impedancji górnej w gałęzi komutowanej (I) mostka, od strony przekątnej mostka. Następnie równoważy się mostek dla wybranej harmonicznego mierzonego napięcia U przestrajać impedancję dolną P w gałęzi komutowanej mostka. Za pomocą łącznika S rozwiera się impedancję pomocniczą T i rejestruje się za pomocą przetworników napięcia AD2; AD3, wartości chwilowe napięcia U_2 na impedancji T , oraz wartości chwilowe napięcia U_3 na przekątnej mostka. Czas tego pomiaru jest dłuższy niż okres wybranej harmonicznego wysokiego napięcia U . Wartości chwilowe napięć U_2 i U_3 są wykorzystywane do wyznaczenia wskazów tych napięć, a na ich podstawie wyznaczana jest zespolona przekładnia dzielnika Z - R w gałęzi stałej (II). Znając wartość przekładni k oraz napięcia U_1 (zmierzonego z wykorzystaniem przetwornika AD1), można wyznaczyć wartość napięcia wejściowego U .



Rys. 3. Opatentowany układ dzielnika technicznego z autokalibracją

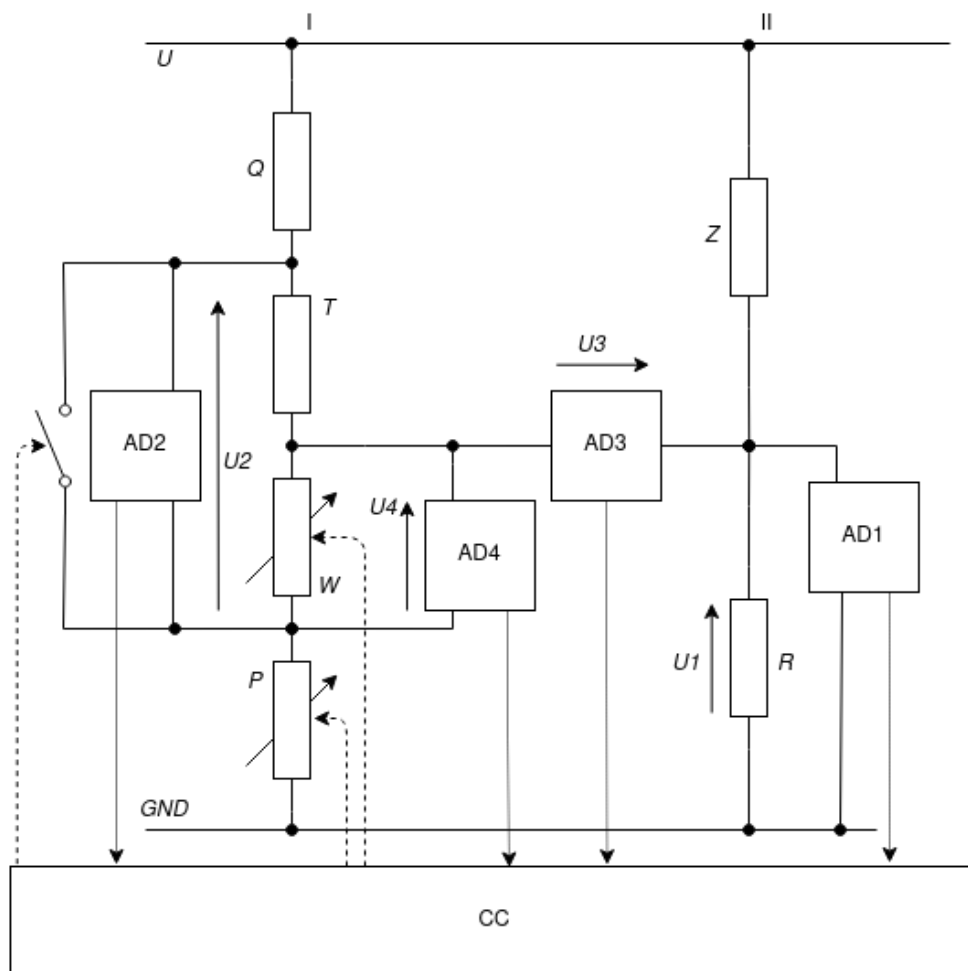
Układ działa w pełni automatycznie, pod kontrolą jednostki sterująco-obliczeniowej CC. Ponieważ operuje on na wskazach napięć, przekładnia k jest wyznaczana dla każdej składowej harmonicznnej osobno. Oznacza to, że wyznaczenie k dla wszystkich harmonicznnych może zająć dużo czasu. Nie jest to jednak kłopotliwe, ponieważ wartość k zależy przede wszystkim od warunków środowiskowych i starzenia elementów, a tym samym zmienia się powoli.

Dzielnik w wersji technicznej charakteryzuje się występowaniem błędu metody, spowodowanego tym, że pomiar napięcia na przekątnej mostka wiąże się z przepływem prądu przez przetwornik mierzący to napięcie, co zaburza rozkład napięć w całym układzie pomiarowym.

Ta wersja dzielnika została wdrożona i stała się podstawą konstrukcji kilkakrotnie prezentowanej przez wykonawcę ze strony przemysłu na targach branżowych ENERGETAB w Bielsku-Białej oraz ENEX w Kielcach. Jako dowód przedstawiam kopię ulotki prezentowanej na targach (załącznik nr 4a, poz. 5).

4.3. Patent “Sposób i układ do laboratoryjnego pomiaru wysokiego napięcia”

W drugim opatentowanym układzie kompensuje się upływ prądu przez element AD3, tym samym poprawiając dokładność pomiaru kosztem zwiększenia złożoności układu pomiarowego. Schemat układu jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Opatentowany układ dzielnika laboratoryjnego z autokalibracją

Praca układu polega, podobnie jak w poprzednim przypadku, na cyklicznym przełączaniu stycznika S i równoważeniu układu mostkowego. W każdym cyklu pracy w gałęzi komutowanej mostka (I), za pomocą łącznika S sterowanego sygnałem z jednostki sterująco-obliczeniowej CC zwiera się impedancję wydzieloną T oraz impedancję kompensacyjną W . Następnie równoważy się mostek dla wybranej harmonicznej mierzonego wysokiego napięcia U przestrajając impedancję P . Potem za pomocą łącznika S rozwiera się impedancję wydzieloną T oraz impedancję kompensacyjną W . Przestrzaja się impedancję kompensacyjną W tak aby ponownie zrównoważyć mostek zachowując nie zmienioną wartość impedancji P . Za pomocą podłączonych przetworników rejestruje się wartości chwilowe napięć U_2 i U_4 . Na ich podstawie wyznacza się wskaźy napięć, które następnie są wykorzystywane do obliczenia wartości zespolonej przekładni k , a tym samym napięcia wejściowego U . Warto zaznaczyć, że przetwornik AD3 pełni w tym układzie rolę wyłącznie wskaźnika równowagi i w trakcie rejestracji napięć U_2 i U_4 nie ma na nim napięcia, a tym samym nie występuje błąd metody cechujący poprzednio opatentowane rozwiązanie.

4.4. Publikacja “Contactless Measurement of Substation Busbars Voltage and Waveforms Reconstruction Using Electric Field Sensors and Artificial Neural Network”.

O ile zaletą systemu z autokalibracją jest uzyskanie wysokiej dokładności pomiaru przy braku konieczności częstego powtarzania kalibracji i przy wysokiej odporności na warunki środowiskowe, to sama instalacja systemu jest skomplikowana ze względu na konieczność galwanicznego połączenia dwóch przyrządów pomiarowych z każdą szyną pod napięciem. Z tej przyczyny system taki nie nadaje się do pomiarów doraźnych i zajmuje dużo miejsca, co ogranicza możliwości jego zastosowania. Jednym z możliwych rozwiązań kwestii mobilności systemu i zajmowanego przezeń miejsca jest zastosowanie systemu pomiaru napięć fazowych wykorzystującego czujniki pola elektrycznego wytwarzanego przez przewody pod napięciem. Jest to tematyka drugiej części prezentowanego osiągnięcia badawczego. Rozważany system w ogólnym ujęciu składa się z P czujników pola rozmieszczonych w otoczeniu N przewodów pod napięciem. Czujniki rejestrują wartości chwilowe potencjałów pola elektrycznego w miejscach, w których są zainstalowane. Następnie z wykorzystaniem algorytmów analizy sygnałów odtwarzane są wartości chwilowe lub fazy napięć fazowych. Kwestie badawcze w tej tematyce objęły:

- sposób kalibracji systemu i odtwarzania napięć,
- kwestię rozmieszczenia czujników pola elektrycznego,
- konstrukcję czujników pola i jej wpływ na właściwości pomiarowe systemu,
- założenia i analizę możliwości konstrukcji systemu z autokalibracją.

W ramach publikacji “Contactless Measurement of Substation Busbars Voltages and Waveforms Reconstruction Using Electric Field Sensors and Artificial Neural Network” przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do odtwarzania sygnałów napięć fazowych na podstawie sygnałów dostarczonych przez pięć umieszczonych pod szynoprzewodami czujników pola elektrycznego. Byłem głównym pomysłodawcą przedstawionego w publikacji rozwiązania, pomimo iż mój wkład nie był największy ze wszystkich autorów. Do badań wykorzystano czujniki pola o niezwykle prostej konstrukcji. Składały się one z kawałków płaskiej blachy stalowej o wymiarach 6x6 cm, podłączonych ekranowanymi przewodami bezpośrednio do wejść rejestratora napięcia. Po umieszczeniu w polu elektrycznym czujniki te sprzęgały się pojemnościowo z szynoprzewodami rozdzielni eksperymentalnej, dzięki czemu na wejścia rejestratora dostarczane były niewielkie napięcia, będące w praktyce ważoną sumą pochodnych napięć mierzonych. Do odtworzenia wartości napięć wykorzystano sztuczną sieć neuronową, przy czym prowadzone badanie miało na celu określenie wpływu rodzaju i parametrów sieci na właściwości metrologiczne systemu. Ponieważ sieci neuronowe zostały w omawianym przypadku użyte do modelowania układu dynamicznego, korzystano z sieci z liniami opóźniającymi. Sprawdzone cztery struktury sieci:

- liniową (*Linear Network, LINN*),
- z opóźnieniem czasowym (*Time Delay Network, TDN*),
- nieliniową autoregresyjną z wejściami zewnętrznymi (*Nonlinear Autoregressive Network With External Inputs, NARX*),
- warstwową rekurencyjną (*Layer Recurrent Network, LYRC*).

Dla każdej sieci sprawdzono kilka różnych wartości opóźnienia wejściowego, opóźnień sprzężenia zwrotnego oraz liczby neuronów w warstwie ukrytej sieci. Dla każdego przypadku porównano działanie sieci nauczonej z wykorzystaniem przebiegów w stanie ustalonym oraz przebiegów przy występowaniu zapadów napięcia. Wybrane wyniki weryfikacji zostały zestawione w tabeli 1.

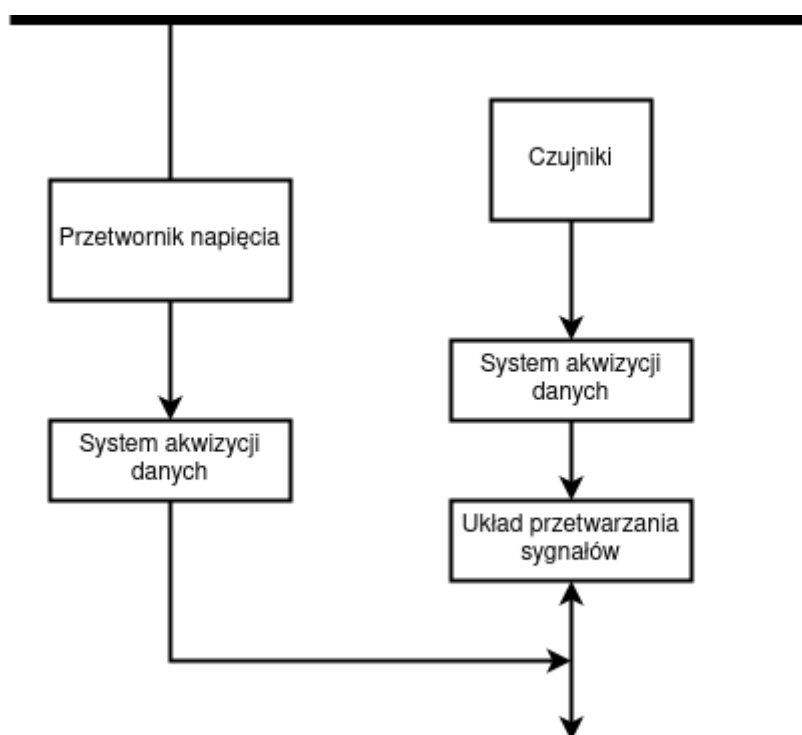
Tabela 1. Zestawienie wybranych błędów skutecznych i maksymalnych dla wybranych sieci neuronowych, dla fazy L1. Metoda odniesienia wykorzystuje model systemu przewodów sieci i czujników, o wartościach zidentyfikowanych z wykorzystaniem miernika RLC

typ sieci	dane uczące	dane testowe	błąd RMS (L1)	błąd max. (L1)
metoda odniesienia	N/D	stan ustalony zapady	3,8% 5,3%	42,7% 13,7%
LINN-0-L	stan ustalony	stan ustalony zapady	0,2% 1,0%	1,2% 85%
TMDL-5-S		stan ustalony zapady	0,3% 0,9%	1,3% 91%
LYRC-5-S		stan ustalony zapady	0,3% 2,3%	1,3% 75%
LINN-0-L	zapady	stan ustalony zapady	1,5% 1,0%	48% 53%
TMDL-5-L		stan ustalony zapady	1,5% 1,0%	7,0% 119%
LYRC-5-S		stan ustalony zapady	0,9% 0,8%	3,9% 37%

Można zauważyć, że bardzo dobre wyniki uzyskano z wykorzystaniem sieci liniowej (LINN). Jest to zgodne z oczekiwaniem, jako że w obwodzie nie spodziewano się znaczących nieliniowości. Dodatkową zaletą tego rodzaju sieci jest najkrótszy z badanych czas uczenia, wciąż jednak sięgający kilkudziesięciu minut. Inną interesującą siecią jest LYRC, oferująca najlepszą jakość odtwarzania sygnałów przy występowaniu zapadów. Dodatkowo stwierdzono, że sieć szkolona przy stanie ustalonym, zgodnie z oczekiwaniem, radzi sobie źle z odtwarzaniem napięcia, w którym występują zapady. Jednocześnie sieć nauczona sygnałem z zapadami napięcia radzi sobie gorzej w stanie ustalonym, ale lepiej przy występowaniu zapadów. Zachowanie to można porównać do działania przekładników napięciowych pomiarowych, dokładnych przy ustalonym stanie napięcia oraz zabezpieczeniowych, mniej dokładnych, ale tolerujących stany nieustalone. Jako że sztuczne sieci neuronowe są tworem programowymi, wykorzystanie opracowanego systemu pozwala na implementację obu rodzajów przetwarzania z wykorzystaniem jednego zestawu czujników.

4.5. Patent “Sposób kalibracji oraz układ kalibracji układu przetwarzania sygnałów w układzie do bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej”

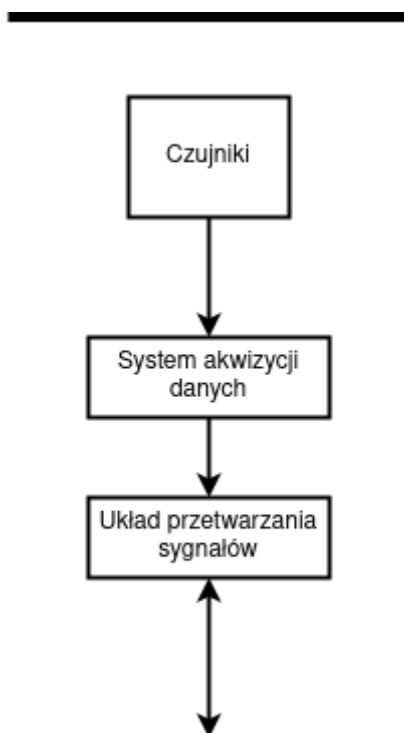
Opracowana koncepcja była na tyle interesująca, że zdecydowano się na przygotowanie dwóch powiązanych ze sobą zgłoszeń patentowych. Zostały one wykonane z równym udziałem wszystkich autorów. Pierwszy patent dotyczy sposobu kalibracji systemu z czujnikami pola, z wykorzystaniem przetworników odniesienia i systemów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Kalibracja jest dokonywana na stanowisku, na którym system z czujnikami pola ma być później wykorzystywany do pomiarów, i przy niezmienionej konfiguracji systemu. Rysunek 5 przedstawia schemat blokowy ilustrujący sposób podłączenia systemu z czujnikami pola i przetworników odniesienia.



Rys. 5. Sposób podłączenia systemu z czujnikami pola i przetworników odniesienia podczas kalibracji. Rysunek pochodzi z omawianego patentu, przy czym oznaczenia numeryczne zmieniono na opisowe.

4.6. Patent “Sposób bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej oraz układ do bezdotykowego pomiaru napięcia szyny fazowej”

Drugi patent chroni sposób wykorzystania układu do pomiaru napięcia, polegający na użyciu systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów pracującego w czasie rzeczywistym. Chroniony jest też sposób podłączenia czujników pola do wejść systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów. Koncepcję systemu podczas pracy przedstawia rysunek 6. Warte zaznaczenia jest, że sam system pomiarowy z czujnikami pola, przedstawiony na rysunku 6, jest taki sam jak na rysunku 5. Zilustrowano w ten sposób fakt, że podczas kalibracji nie jest konieczna zmiana konfiguracji systemu ani wyprowadzenie żadnego z sygnałów pośrednich.



Rys. 6. Sposób połączenia systemu pomiarowego z czujnikami pola podczas pracy. Rysunek pochodzi z omawianego patentu, przy czym oznaczenia liczbowe zamieniono na opisowe

4.7. Monografia “Bezkontaktowe systemy do pomiarów średnich i wysokich napięć w elektroenergetyce”

Zaprezentowane powyżej rezultaty badań wskazują, że systemy wykorzystujące czujniki pola elektrycznego do pomiaru napięć mogą być stosowane praktycznie, jednak konieczne jest dopracowanie wielu zagadnień. W szczególności problemem jest kalibracja, która w przypadku zastosowania sieci neuronowych wymaga długotrwałych obliczeń, a w przypadku pomiarów pojemności jest bardzo niedokładna. Dodatkowo nawet najlepsze uzyskane dokładności pomiarów były porównywalne z oferowanymi przez przekładniki stosunkowo niskiej klasy 1. Ponadto podczas prowadzenia prac pojawiło się wiele dodatkowych zagadnień, które uznałem za wartę dokładniejszego zbadania. W związku z tym podjąłem się głębszych badań nad tematyką pomiarów napięć z wykorzystaniem czujników pola elektrycznego. Uzyskane wyniki zostały zestawione w monografii *“Bezkontaktowe systemy do pomiarów średnich i wysokich napięć w elektroenergetyce”*, wydanej w 2020 przez wydawnictwa AGH. W monografii przedstawiono wyniki badań nad następującymi zagadnieniami badawczymi:

- kwestia kalibracji systemu na stanowisku pracy, z wykorzystaniem naturalnych lub generowanych pobudzeń,
- konstrukcja czujników pola elektrycznego, w szczególności wpływ zastosowanego wzmacniacza części analogowej na działanie systemu pomiarowego jako całości,
- zagadnienie optymalnego rozmieszczenia czujników w otoczeniu przewodów pod napięciem,
- system do pomiarów napięcia wykorzystujący czujniki pola elektrycznego i oferujący możliwość prowadzenia cyklicznej autokalibracji. W szczególności sformułowano założenia, warunki pracy i ograniczenia dla tego rodzaju systemów.
- Nowatorska konstrukcja czujnika napięcia przeznaczonego do instalacji na przewodzie pod napięciem.

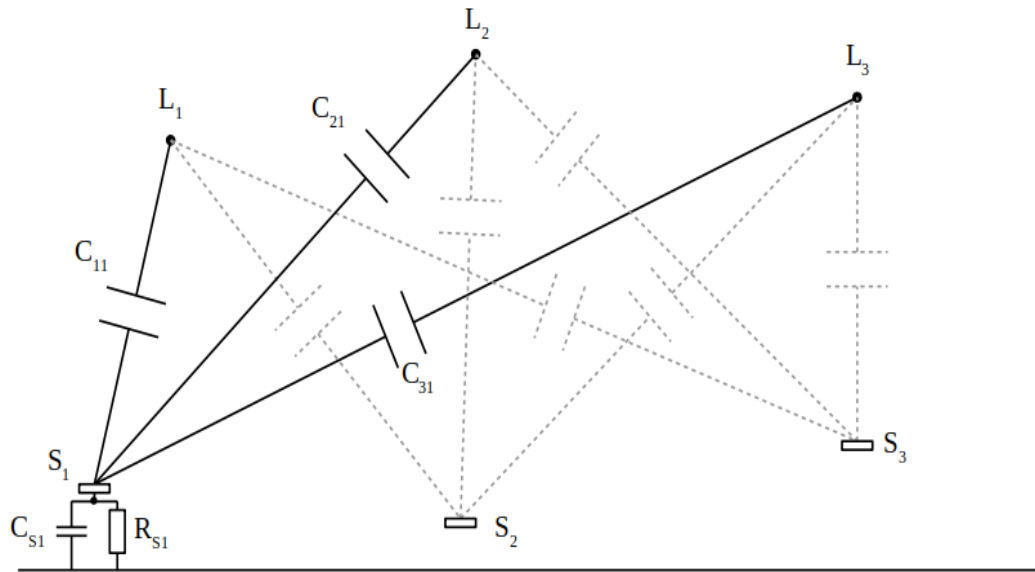
Wszystkie wyżej wymienione zagadnienia nie były prezentowane w wymienionych w poprzednich punktach publikacji i patentach dotyczących tej tematyki.

4.7.1. Modele systemu i jego kalibracja

Opracowane modele systemu pomiarowego miały w założeniu być wykorzystane w dalszych pracach, dotyczących optymalizacji rozmieszczenia czujników, opracowaniu metody autokalibracji, czy analizie zachowania systemu przy częściowym ekranowaniu czujników. Oznacza to że modele i powiązane z nimi metody kalibracji powinny być zweryfikowane, a zakres ich zastosowania dokładnie określony. Z tej przyczyny poza opracowaniem modeli i metody kalibracji przeprowadzono szereg eksperymentów laboratoryjnych weryfikujących ich poprawność.

Przy opracowaniu modeli systemu pomiarowego przyjęto założenia upraszczające. Pierwsze z nich polega na założeniu, że system jako całość pracuje w polu bliskim, czyli rozmiary geometryczne systemu są znacznie mniejsze niż długość fali elektromagnetycznej dla przetwarzanego pasma. W praktyce nie stanowi to znaczącego ograniczenia, zawężając pasmo przenoszenia, dla którego modele są adekwatne do kilku megaherców. Napięcia o tak szerokim paśmie są w energetyce rzadko spotykane. W razie potrzeby analizy takich napięć należy rozważyć adekwatność modeli w świetle przyjętego założenia. Drugie przyjęte założenie dotyczy konstrukcji samych czujników pola. Przyjęto, że stosowane są czujniki potencjału pola elektrycznego, przy czym mierzony jest potencjał elektrody czujnika względem ziemi.

Łączne zastosowanie podanych wyżej założeń pozwala przedstawić sprzężenia między przewodami linii a czujnikami jako sieć pojemności. Jednocześnie każdy z czujników może być z dobrym przybliżeniem reprezentowany jako szeregowy układ RC. Ostatecznie układ sprzężeń wytworzony przez pojedynczy czujnik można przedstawić w sposób pokazany na rysunku 7.



Rys. 7. Ilustracja sprzężeń pojemnościowych pomiędzy przewodami linii L_1 , L_2 , L_3 a czujnikami S_1 , S_2 , S_3 . Liniami ciągłymi zaznaczono pojedynczy kompletny obwód pojedynczego czujnika S_1 , z uwzględnieniem elementów modelu czujnika.

Taki model obwodowy może zostać opisany równaniami wykorzystującymi impedancje (admitancje) lub równaniami różniczkowymi. W pierwszym przypadku model przyjmuje postać:

$$\underline{U} = \underline{Y}^{-1} \underline{I}_S \quad (5)$$

gdzie $\underline{U}$ jest wektorem napięć mierzonych, $\underline{Y}^{-1}$ to odwrotność macierzy admitancji układu, a $\underline{I}_S$ jest wektorem zmierzonych prądów wpływających do elektrod czujników i płynących przez elementy czujnika. Wszystkie wartości w równaniu są zespolone. W przypadku drugim model przyjmuje podobną postać:

$$\underline{U}' = \underline{C}^{-1} \underline{I}_{SCR} \quad (6)$$

gdzie $\underline{U}'$ to wektor pochodnych napięć wejściowych, $\underline{C}^{-1}$ jest odwrotnością macierzy pojemności układu, a $\underline{I}_{SCR}$ to, wektor wartości łączących ze sobą prądy czujników oraz wartości ich elementów wewnętrznych. W przypadku tego modelu wszystkie wartości w równaniu reprezentują wartości chwilowe. Kalibracja systemu opisanego powyższymi modelami polega na wyznaczeniu wartości macierzy $\underline{Y}$ lub $\underline{C}$ w równaniach odpowiednio (5) lub (6). Ponieważ liczba elementów macierzy współczynników wynosi $N \cdot P$, a liczba znanych wartości $N+P$, nie ma możliwości bezpośredniego wyznaczenia zawartości macierzy. Zamiast tego można przyjąć założenie o niezmienności macierzy. Ponieważ macierze $\underline{Y}$ oraz $\underline{C}$ reprezentują elementy obwodu, założenie to jest spełnione w stosunkowo długim czasie. Dzięki temu można skorzystać ze zmian wartości napięć do wyznaczenia współczynników równań (5) lub (6). Ostateczne równania kalibracji mają postać:

$$\underline{Y}_{Anp} = \underline{U}_{nk}^{-1} \underline{I}_{Spk} \quad (7)$$

dla modelu impedancyjnego oraz

$$C_{np} = U_{nk}^{-1} I_{SCRpk} \quad (8)$$

dla modelu z równaniami różniczkowymi. Równania te są zapisane dla pojedynczego czujnika o indeksie p . Wektory $\underline{Y}_{Anp}$ oraz C_{np} przedstawiają sprzężenia między czujnikiem a wszystkimi przewodami pod napięciem. Wektory $\underline{I}_{Spk}$ oraz I_{SCRpk} zawierają wartości prądów mierzonych podczas k kroków kalibracji. Macierze $\underline{U}_{nk}^{-1}$ oraz $\underline{U}'_{nk}^{-1}$ są budowane przez połączenie wektorów napięć fazowych mierzonych podczas kalibracji przyrządem odniesienia, w k kolejnych krokach.

Założona wcześniej zmienność napięć wejściowych w kolejnych krokach kalibracji może zostać uzyskana na dwa różne sposoby. Jeżeli skorzysta się z naturalnej zmienności wartości napięć, mamy do czynienia z eksperymentem biernym. W przypadku samodzielnego wymuszenia zmian, mówi się o eksperymentcie czynnym. Eksperyment bierny lepiej sprawdza się w przypadku modelu opartego na równaniach różniczkowych, gdyż model ten wymaga zmienności wartości chwilowej napięć, a zatem zjawiska zupełnie naturalnego w przypadku systemów prądu przemiennego. Chcąc przeprowadzić identyfikację modelu opartego na impedancjach, lepiej jest przeprowadzić eksperyment czynny który w najprostszym przypadku polega na włączaniu lub wyłączaniu poszczególnych faz.

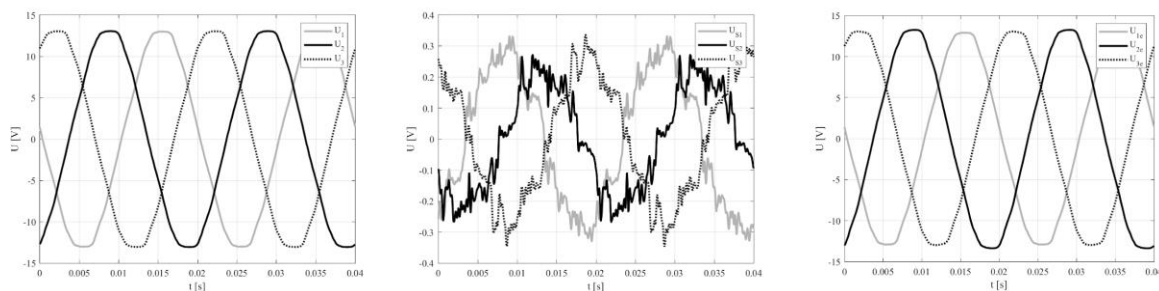
Wprawdzie modele zostały opracowane do zastosowania w późniejszych badaniach nad optymalizacją rozmieszczenia czujników, jednak wyniki prac okazały się bardziej uniwersalne niż początkowo zakładano. Modele znalazły zastosowanie przy opracowaniu metody autokalibracji oraz przy analizie zachowania systemu z czujnikami z częściowym ekranowaniem.

4.7.2. Weryfikacja modelu i metody kalibracji przez badania eksperymentalne

Celem badań eksperymentalnych było zweryfikowanie poprawności opracowanych modeli, a także sprawdzenie wpływu konstrukcji obwodu analogowego na działanie czujnika oraz systemu pomiarowego jako całości. Przygotowano trzy wersje obwodów analogowych czujników, różniące się zastosowanym wzmacniaczem. Były to układy ze wzmacniaczem nieodwracającym, transimpedancyjnym oraz ładunkowym.

Przeprowadzone badania eksperymentalne dzieliły się na dwa cykle. W pierwszym cyklu prowadzono badania przy niskim napięciu, sprzężenia linia-czujnik realizując z wykorzystaniem sieci pojemności zbudowanej z dyskretnych kondensatorów. Badania te służyły uruchomieniu czujników i ich wstępnemu przebadaniu oraz sprawdzeniu działania stanowiska. Po ich zakończeniu rozpoczęto drugi cykl badań eksperymentalnych, które tym razem były prowadzone w rozdzielni eksperymentalnej średniego napięcia. Rozdzielnia ta pozwala na dowolną kontrolę wartości napięcia oraz jest wyposażona w dzielniki odniesienia o niepewności 1 % w zakresie do 1 MHz. Czujniki zostały rozmieszczone we wnętrzu obudowy torów szynowych rozdzielni, skalibrowane z wykorzystaniem dzielników i użyte w serii pomiarów. Przykład odtwarzania przebiegów napięć przedstawia rysunek 8.

Wyniki przeprowadzonych badań modelowych pokazały, że opracowane modele są poprawne, i pozwalają na dokładne odtworzenie napięć mierzonych. Uzyskane błędy odtworzenia napięć były na poziomie poniżej 1% (względem dzielników rezystancyjnych, dla czujników ze wzmacniaczami odwracającymi). Są to wartości porównywalne z wynikami publikowanymi przez innych autorów, a tym samym opracowane modele stanowią dobry punkt wyjścia do dalszych prac.

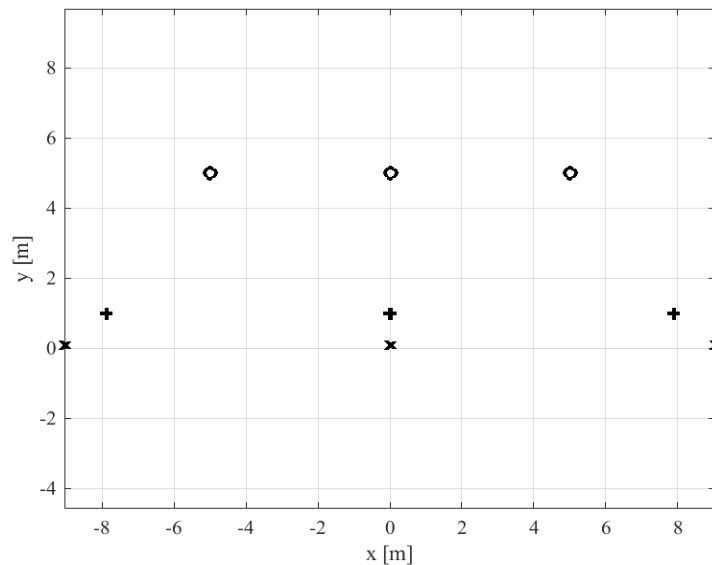


Rys. 8. Proces odtwarzania przebiegów napięć fazowych rozdzielni średniego napięcia. Od lewej: przebiegi napięć na szynoprzewodach rozdzielni, przebiegi napięć wyjściowych z czujników pola, odtworzone przebiegi napięć rozdzielni

4.7.3. Optymalizacja rozmieszczenia czujników pola

Interesującym i nie poruszonym wcześniej zagadnieniem jest kwestia rozmieszczenia czujników pola w otoczeniu przewodów w taki sposób, że system pomiarowy jako całość uzyskuje możliwie najwyższą dokładność. W monografii zaproponowano rozwiązanie tego zagadnienia, oparte o analizę właściwości numerycznych równania (2). Równanie to wymaga odwrócenia macierzy C . Dokładność tej operacji zależy od uwarunkowania macierzy, które może być opisane współczynnikiem uwarunkowania $R(C)$. Przy założeniu, że wszystkie przewody linii mają taki sam przekrój oraz że wszystkie czujniki mają takie same elektrody, pojemności w macierzy C zależą w sposób ciągły i monotoniczny od odległości między przewodami linii a czujnikami. Można zatem ułożyć zadanie optymalizacji, w której wartościami optymalizowanymi są współrzędne geometryczne umieszczenia czujników, a kryterium jest współczynnik $R(C)$. Dodatkowo, ze względu na wcześniejsze założenia o zależności między pojemnością a odległością linia-czujnik, możliwe jest uproszczenie zagadnienia przez zastosowanie współczynnika $R(L)$, liczonego dla macierzy odległości linia-czujnik.

W monografii zaprezentowano wyniki szeregu optymalizacji numerycznych współczynnika $R(L)$, przeprowadzonych dla kilku różnych układów linii. Stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskuje się przy płaskim układzie linii, przy czym uzyskane optymalne położenie czujników jest nieco inne niż powszechnie stosowane. W znalezionym optymalnym położeniu czujniki o skrajnych współrzędnych są umieszczone „szerzej” niż przewody linii, podczas gdy w literaturze stosowane jest niemal wyłącznie umieszczenie czujników bezpośrednio pod linią. Przykładowy zestaw rozwiązań dla układu płaskiego linii i ułożenia czujników 10 cm oraz 1 m nad podłożem przedstawia rysunek 9. Współczynniki $R(L)$ dla obu przypadków zestawiono z najczęściej stosowanym układem czujników w tabeli 2. Można zauważyć, że zastosowanie zaproponowanej metody optymalizacji daje około trzykrotne zwiększenie współczynnika uwarunkowania względem dotychczas stosowanego rozmieszczenia bezpośrednio pod przewodami linii, dla małej wysokości umieszczenia czujników nad podłożem. Dokonanie podobnego porównania nie jest niestety możliwe dla innych układów linii, gdyż przykłady stosowane w literaturze odnoszą się niemal bez wyjątku do układu płaskiego. Tym samym nie da się wyróżnić powszechnie stosowanego rozmieszczenia czujników względem innych układów linii. Fakt ten ukazuje nowatorski charakter przedstawionych badań.



Rys. 9. Przykładowe optymalne rozmieszczenie czujników pola pod linią jednotorową w układzie płaskim, dla wysokości 10 cm nad podłożem (znaki x) oraz 100 cm nad podłożem (znaki +). Okręgi oznaczają położenia przewodów linii

Tabela 2. Zestawienie współczynników $R(L)$ dla rozmieszczeń optymalnych z rysunku powyżej, ze współczynnikami dla rozmieszczeń spotykanych dotychczas w literaturze (oznaczone odniesienia).

Wysokość nad podłożem	$R(L)$ optymalne	$R(L)$ odniesienia
0,1 m	0,032	0,014
1 m	0,042	0,032

4.7.4. System z autokalibracją

Opisany powyżej sposób kalibracji systemu pomiarowego jest poprawny przy założeniu, że odległości pomiędzy przewodami linii a czujnikami pola nie ulegają zmianie podczas użytkowania systemu. Założenie to ogranicza zakres zastosowań systemu, przez co podjęte zostały prace nad autokalibracją. Zaproponowane rozwiązanie polega na zastosowaniu zmiany wartości elementów wewnętrznych czujników pola, a tym samym wykonanie rekonfiguracji obwodu. Na podstawie wartości sygnałów wyjściowych czujników przed zmianą i po zmianie identyfikowane są jednocześnie wartości napięć wejściowych, jak i pojemności między przewodami linii a czujnikami. Aby było to możliwe, konieczne jest jednak przyjęcie założenia dotyczącego wartości pojemności. Mówi ono o tym, że dla układu trójfazowego i trzech czujników, w układzie mogą wystąpić co najwyżej trzy różne wartości pojemności. Założenie to jest spełnione tylko dla płaskiego układu linii trójfazowej i tylko dla dwóch specyficznych sposobów rozmieszczenia czujników pod linią. Rozmieszczenia te przedstawiono na rysunku 4. Nie gwarantują one dobrego uwarunkowania numerycznego w sensie metody optymalizacji przedstawionej w części 3.2.3, ale są jedynymi możliwymi dla systemu z autokalibracją.

Co prawda ograniczenie do płaskiego układu linii mocno zawęża zakres zastosowań systemu, jednak wciąż możliwe są pomiary np. napięć rozdzielni zewnętrznych wysokiego napięcia, w których układ płaski jest powszechnie stosowany. Interesującym zastosowaniem zaproponowanej metody

autokalibracji jest diagnostyka linii. Ponieważ identyfikowane są równocześnie napięcia i pojemności układu, możliwe jest badanie zmian geometrii (zwisu) przewodów linii pośrednio przez badanie zmian pojemności, bez przerywania pomiarów napięć. System bezkontaktowych pomiarów napięć z autokalibracją, pomimo iż przedstawiony w monografii wyłącznie teoretycznie, jest istotny ze względu na swój unikatowy na skalę światową charakter.

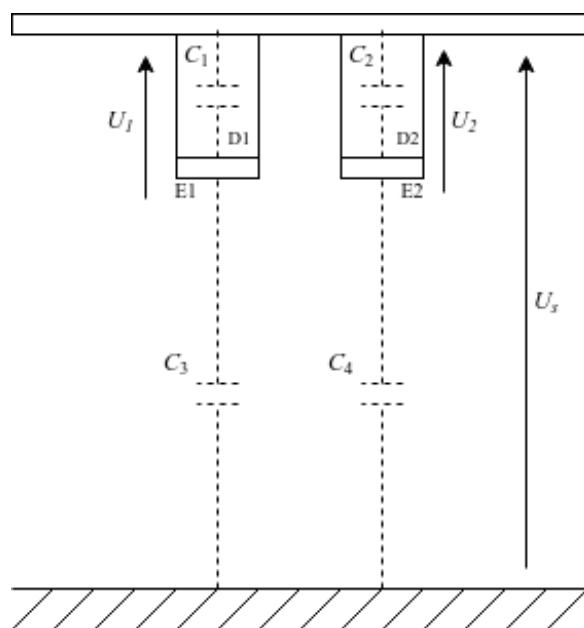
4.7.5. Częściowe ekranowanie czujnika pola elektrycznego

Kolejnym podjętym zagadnieniem badawczym była kwestia poprawy dokładności systemu pomiarowego jako całości przez częściowe ekranowanie czujników. Ekranowanie to polega na osłonięciu ekranem boków elektrody. Celem takiego działania jest zmniejszenie pojemności pomiędzy elektrodą czujnika a elementami znajdującymi się w bok od niej, przy jednoczesnym zachowaniu w miarę możliwości pojemności między elektrodą a elementami na wprost od niej. Efektem jest poprawa selektywności czujnika i w połączeniu z odpowiednim jego obróceniem („celowaniem” w linię) poprawa uwarunkowania macierzy C a tym samym uzyskanie większej dokładności systemu jako całości. Przeprowadzono badania metodą elementów skończonych, które wykazały, że konieczne może być wysterowanie ekranu napięciem zależnym od napięcia mierzonego (ekran aktywny). W związku z tym przygotowano model czujnika z możliwością stosowania wymiennych ekranów z rury stalowej, z możliwością kontrolowania potencjału ekranu. Model ten poddano badaniom eksperymentalnym przy średnim napięciu. Wyniki badań wykazały, że możliwa jest poprawa uwarunkowania macierzy C przez zastosowanie częściowego aktywnego ekranowania. Poprawa selektywności jest na poziomie około 10%, przy czym odbywa się kosztem ponad trzykrotnego spadku czułości systemu jako całości. Tym samym przed zastosowaniem ekranowania czujników należy starannie rozważyć wady i korzyści rozwiązania odnoszące się do środowiska pomiarowego. W literaturze odnoszącej się do przedmiotu monografii nie odnaleziono zastosowania ekranów do poprawy selektywności, choć tego rozwiązania są popularne wśród np. systemów dotykowych z których autor czerpał inspirację. Tym samym zaprezentowane rozwiązanie, mimo iż wzorowane na rozwiązaniach istniejących, jest nowatorskie ze względu na zastosowanie.

4.7.6. Konstrukcja czujnika do montażu na przewodzie

Poza pracami nad systemami pomiarowymi jako całością, podjęto również badania nad konstrukcją czujników. Zagadnienie, które zostało zaprezentowane w monografii dotyczy konstrukcji czujnika napięcia przeznaczonego do instalacji na przewodzie pod napięciem, bez galwanicznego połączenia z innymi elementami obwodu. Czujnik taki byłby w założeniu przeznaczony do współpracy z instalowanymi w taki sam sposób czujnikami prądu, pozwalając na skonstruowanie zwartego systemu do pomiaru wszystkich parametrów energii elektrycznej i możliwego do zainstalowania w całości na przewodzie pod napięciem. Konstrukcję oraz schemat elektryczny czujnika przedstawiono na rysunku 10. Składa się on z elementów dielektrycznych $D1$ oraz $D2$, przymocowanych jedną stroną do przewodnika pod napięciem U_s . Do elementów tych przymocowane są przewodzące elektrody $E1$ i $E2$. Ponieważ elementy dielektryczne mają takie same rozmiary i są umieszczone blisko siebie, pojemności między nimi a otoczeniem są z dobrym przybliżeniem takie same, czyli $C_3=C_4$. Tym samym w przypadku zróżnicowania pojemności C_1 i C_2 , pomiędzy elektrodami pojawi się napięcie, które będzie zależne wyłącznie od napięcia U_s . Ponieważ uprzednio założono, że wymiary geometryczne elementów dielektrycznych są takie same, jedynym sposobem zróżnicowania pojemności C_1 i C_2 jest wytworzenie tych elementów z materiałów dielektrycznych o różnych współczynnikach przenikalności dielektrycznej ϵ_m .

W celu weryfikacji koncepcji czujnika skonstruowano jego model i przeprowadzono badania. Model laboratoryjny czujnika składał się z dwóch cylindrycznych elementów o średnicy 10 mm i długości 15 mm. Zostały one zbudowane z teflonu (poli(tetrafluoroetyleny), PTFE) o $\epsilon_m=2$, oraz polioksymetyleny (POM) o $\epsilon_m=3,7$. Elementy te zostały przymocowane do płytki aluminiowej w celu ułatwienia przyłączania do przewodów pod napięciem. Elektrody $E1$ i $E2$ skonstruowano z samoprzylepnej folii miedzianej.



Rys. 10. Konstrukcja i odpowiadający jej schemat elektryczny zaproponowanego czujnika napięcia

Model czujnika wymagał układu akwizycji sygnałów i transmisji danych pomiarowych, zdolnego do pracy pod średnim napięciem. Układ taki skonstruowano z wykorzystaniem mikrokontrolera PIC16, który przetwarzał napięcia z wykorzystaniem wewnętrznego przetwornika A/C, a następnie przesyłał próbki łączem światłowodowym do układu odbiornika, który przekazywał dane do rejestratora. Obwód wejściowy zbudowano w oparciu o wzmacniacze operacyjne z wejściem FET, dla zminimalizowania obciążenia bardzo niewielkich pojemności czujnika.

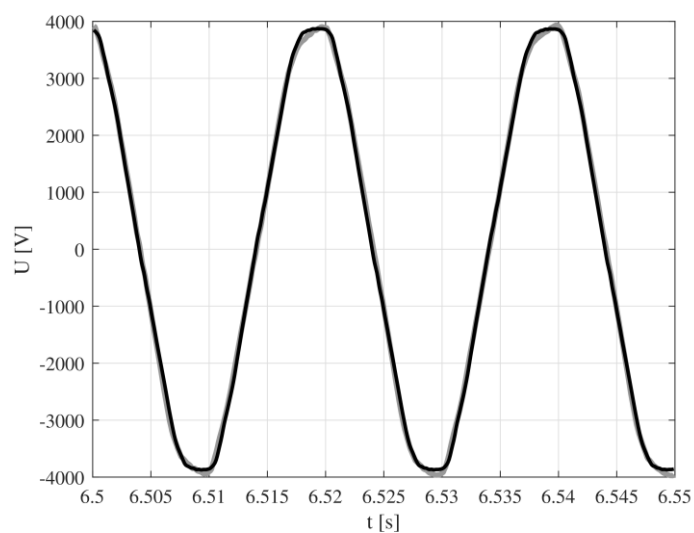
Wyniki badań wskazują, że napięcie wyjściowe układu zależy monotonicznie od napięcia wejściowego, przy czym dla wartości powyżej 1 kV zależność ta jest liniowa. Poniżej tej wartości występuje nieliniowość, której źródłem okazało się być obciążenie czujnika przez wejścia zastosowanych wzmacniaczy operacyjnych. Podczas dalszej analizy danych pomiarowych, wykonanej już po opublikowaniu monografii, zmodyfikowano nieco algorytm odtworzenia napięcia w taki sposób, aby uwzględnić obciążenie struktury czujnika przez wejścia wzmacniaczy systemu akwizycji danych. Pozwoliło to uzyskać błędy odtworzenia wartości skutecznej na poziomie poniżej 1% dla napięć ponad 1700 V. Dla niższych wartości napięć występowały większe błędy względne, co było spowodowane występowaniem stałego komponentu błędu bezwzględnego. Analiza częstotliwościowa pokazała, że jego źródłem są nieliniowości wprowadzane przez system akwizycji napięć i transmisji danych.

Zaprezentowana konstrukcja czujnika co prawda nieco odbiega od ogólnego nurtu monografii, dedykowanej systemom bezkontaktowym, jednak na zamieszczenie tego rozdziału zdecydowano się ze względu na połączenie innowacyjnego charakteru rozwiązania z obiecującymi wynikami wstępnych badań. Uzyskano niskie wartości błędów odtworzenia napięcia już przy pierwszych eksperymentach, co potwierdza koncepcję czujnika oraz pokazuje jego rozwojowy charakter.

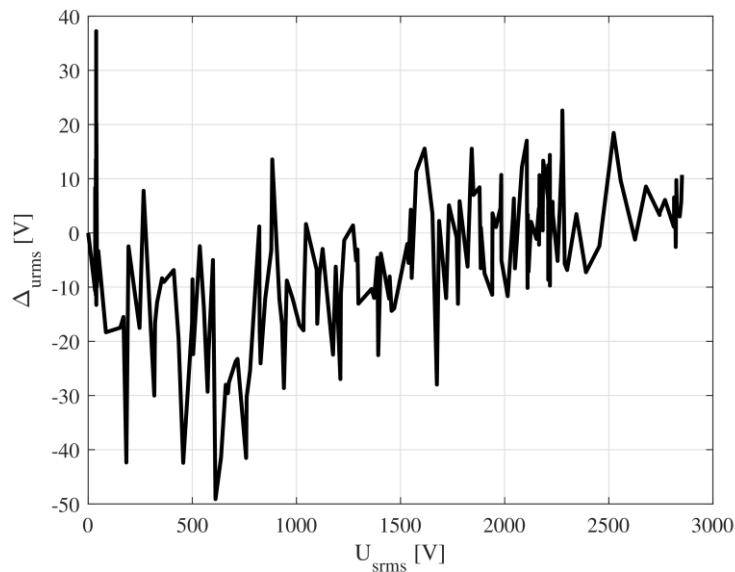
4.8. Artykuł „New Sensor for Medium- and High-Voltage Measurement”

Wyniki kontynuacji prac nad czujnikiem zaprezentowanym w rozdziale 6.6 zostały przedstawione w artykule „*New Sensor for Medium- and High-Voltage Measurement*”, opublikowanym w MDPI Energies w roku 2021. W porównaniu z wcześniej przedstawioną monografią, gdzie czujnik został potraktowany jako temat uzupełniający, w omawianym artykule przedstawiono znacznie bardziej kompletne wyniki symulacji i eksperymentów laboratoryjnych. Wyprowadzone zostały zależności dla przypadków, gdzie czujnik jest obciążony wejściami przetworników analogowo-cyfrowych. Dzięki temu zostały określone równania odtworzenia napięcia wejściowego. Przygotowany został model trójwymiarowy czujnika, który następnie wykorzystano do przeprowadzenia symulacji metodą elementów skończonych (FEM) z wykorzystaniem pakietu COMSOL Multiphysics. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na dokładne określenie spodziewanych rozkładów pola elektrycznego przy wykorzystaniu czujnika do badania napięć w rozdzielni wewnętrznej średniego napięcia. Przede wszystkim jednak dostarczyły one zgodnych z badaniami laboratoryjnymi wartości pojemności wewnętrznych czujnika, do stanowi dodatkowe potwierdzenie poprawności rozumowania. Dzięki wykorzystaniu równań lepiej przybliżających rzeczywistość oraz potwierdzeniu wartości pojemności, możliwe stało się odtworzenie wartości chwilowych napięcia z większą dokładnością niż poprzednio. Przykładowe wartości chwilowe odtworzonego napięcia przedstawia rysunek 11, a błędy wartości skutecznej w funkcji wartości przetwarzanego napięcia przedstawiono na rysunku 12.

Stwierdzono, że czujnik pozwala na uzyskanie błędów wartości skutecznej nie przekraczających 2,5% w zakresie powyżej 1 kV. Względne wartości błędów rosną przy spadku napięcia, przy czym wartości bezwzględne pozostają na stałym poziomie, co sugeruje występowanie zaburzenia o charakterze addytywnym. Zaobserwowano też stosunkowo wysokie zniekształcenie sygnału (THD na poziomie 3%), widoczne na przebiegu z rysunku 11. Ponieważ zastosowany układ rejestracji i transmisji napięć nie został zmieniony, najprawdopodobniej jest on głównym źródłem zniekształceń i błędów przetwarzania wartości skutecznej. Po jego udoskonaleniu można oczekiwać dalszej poprawy dokładności przetwarzania napięcia z wykorzystaniem omawianego czujnika.



Rys. 11. Przykładowy przebieg napięcia wejściowego (czarny) i odtworzonego na podstawie wyjścia z czujnika (popielaty, słabo widoczny ze względu na nałożenie przebiegów)



Rys. 12. Błędy odtworzenia wartości skutecznej w funkcji wartości napięcia przetwarzanego

4.9. Podsumowanie

W ramach będącego przedmiotem osiągnięcia cyklu publikacji i patentów zajmowałem się dwoma kierunkami badawczymi, przy czym w każdym z nich wziąłem udział w opracowaniu oryginalnych i nowatorskich rozwiązań technicznych. W ramach prac nad dzielnikiem średniego i wysokiego napięcia z autokalibracją:

- zaprojektowałem i przeprowadziłem badanie dzielnika oraz opracowałem wyniki, które następnie zaprezentowałem na konferencji ISNCC 2015. Uzyskane wyniki pozwoliły na udoskonalenie opracowywanego dzielnika poprzez zastosowanie dodatkowego ekranowania, a tym samym obniżenie błędów pomiaru z kilkunastu do poniżej 1 %. Dzięki temu stało się możliwe opracowanie rozwiązania konstrukcyjnego dzielnika, które było później prezentowane na targach branżowych.
- Współtworzyłem dwie konstrukcje dzielnika chronione patentami krajowymi. Uzyskanie ochrony patentowej potwierdza oryginalność i innowacyjność proponowanych rozwiązań na tle istniejącego stanu wiedzy. Dodatkowo jedno z rozwiązań stało się podstawą konstrukcji, która była prezentowana jako rozwiązanie komercyjne na targach branżowych.

W ramach prac nad systemami do pomiarów napięć z wykorzystaniem czujników pola elektrycznego:

- zaproponowałem metodę odtwarzania napięć z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Wyniki badania tej metody zostały opublikowane w czasopiśmie *IEEE Transactions on Smart Grids*. Związane z nią szczegółowe rozwiązania techniczne uzyskały ochronę w postaci dwóch patentów krajowych.
- Opracowałem metodę optymalizacji rozmieszczenia czujników pola w otoczeniu, pozwalającą na minimalizację błędów spowodowanych uwarunkowaniem numerycznym zadania kalibracji systemu. Zaproponowana metoda, moim zdaniem, może w przyszłości otworzyć drogę do upowszechnienia stosowania systemów pomiarów napięć z czujnikami pola elektrycznego.

- Zaproponowałem i przebadalem sposób poprawy selektywności czujników pola, w zastosowaniu do zdalnego pomiaru napięć, poprzez częściowe ekranowanie. Proponowane rozwiązanie pozwala uzyskać teoretycznie lepszą dokładność pomiaru poprzez poprawę uwarunkowania numerycznego zadania kalibracji. Odbywa się to jednak kosztem zmniejszenia czułości systemu.
- Zaproponowałem konstrukcję i sposób rozmieszczenia czujników dla systemu pomiaru średnich i wysokich napięć z czujnikami pola i autokalibracją. Moje dotychczasowe prace w tym zakresie mają głównie charakter teoretyczny, jednak stanowią dobrą podbudowę do dalszego rozwoju systemów tego rodzaju.
- Opracowałem konstrukcję czujnika napięcia przeznaczonego do instalowania na przewodzie, przy separacji galwanicznej od pozostałych przewodów i uziemienia. Czujnik wykorzystuje zróżnicowanie współczynników dielektrycznych materiałów swoich elementów składowych do zbudowania sieci pojemności o zadanych właściwościach, pozwalających na odtworzenie napięcia mierzonego przy jednoczesnej minimalizacji wpływu napięć innych przewodów. To rozwiązanie, podobnie jak poprzednie trzy punkty, zostało zamieszczone w monografii wydanej przez Wydawnictwa AGH w roku 2020.
- Przeprowadziłem dalsze badania opracowanego czujnika pola, rozszerzając zakres badań i przygotowując bardziej złożony model matematyczny. Uwzględnienie dodatkowych obciążeń pojemności czujnika oraz przeprowadzenie dokładnej analizy metodą elementów skończonych pozwoliło na uzyskanie niepewności poniżej 2,5 % dla napięć powyżej 1 kV oraz zniekształceń harmoniczných na poziomie 3,5 %, związanych głównie z bardzo prostym systemem pomiaru i transmisji napięć. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w przygotowanej z udziałem współautora zagranicznej publikacji w czasopiśmie MDPI Energies, opublikowanej w lipcu 2021.