

*Andrzej BIEN, Andrzej WETULA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej*

CZUJNIK NAPIĘCIA DO ZASTOSOWANIA W ZDALNYCH SYSTEMACH POMIARU PARAMETRÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W publikacji przedstawiono konstrukcję oraz wyniki wstępnych badań czujnika napięcia przeznaczonego do instalacji bezpośrednio na przewodzie pod napięciem. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych pokazują, że czujnik działa zgodnie z wymaganiami. Konieczne są jednak poprawki systemu akwizycji i transmisji danych.

VOLTAGE SENSOR FOR APPLICATION IN REMOTE ELECTRIC ENERGY PARAMETERS MEASUREMENT SYSTEMS

Paper presents a construction and results of preliminary experiments with a voltage sensor designed for installation on a live wire. Results show that the sensor operates as intended but requires improvements to a data transmission system.

1. WSTĘP

Pomiar parametrów energii elektrycznej wymaga dostosowania wartości napięcia mierzonego do zakresu wymaganego przez scalone przetworniki pomiarowe oraz zapewnienia bezpieczeństwa. O ile zagadnienie to nie stwarza problemów w przypadku niskich napięć (do 1kV), to dla napięć średnich (SN) i wysokich (WN) znacząco rośnie rozmiar i koszt systemu pomiarowego. Jednocześnie uzyskanie wysokiej dokładności i szerokiego pasma przetwarzania staje się coraz trudniejsze.

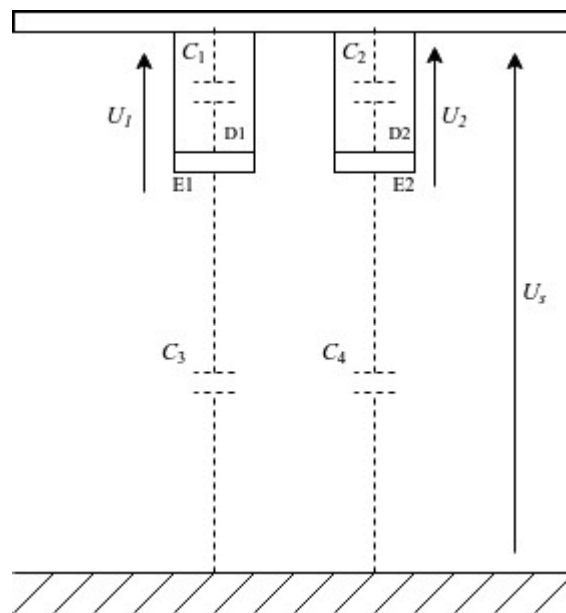
W zakresie średnich napięć najpopularniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie indukcyjnych przekładników napięciowych. Osiągają one pasmo przenoszenia na poziomie kilku kHz i niepewności rzędu 0,1%. Dla napięć wysokich częściej stosowane są kaskadowe połączenia dzielników pojemnościowych i przekładników indukcyjnych. Ze względu na ryzyko wystąpienia ferrezonansu pasmo przenoszenia takich przyrządów jest ograniczane do okolic podstawowej harmonicznej. Innym spotykanym rozwiązaniem są dzielniki rezystancyjne, które pozwalają osiągać pasma rzędu

kilku MHz. Zastosowanie dzielników rezystancyjnych jest jednak ograniczone wskutek braku separacji galwanicznej od przetwarzanego napięcia.

W związku z tym prowadzone są prace nad przetwornikami napięcia o mniejszych rozmiarach i szerszym paśmie przenoszenia [1][2]. Prezentowane rozwiązanie zawiera przetworniki mogące współpracować z przetwornikami prądowymi zainstalowanymi na przewodzie roboczym pod napięciem takimi jak zaprezentowane w pracach [3][4][5][6]. Pozwoliłoby to zbudować system do zbierania danych pomiarowych instalowany w całości na przewodzie pod wysokim napięciem.

2. KONSTRUKCJA CZUJNIKA

Proponowaną konstrukcję czujnika przedstawia rysunek 1. Czujnik jest zbudowany z dwóch elementów dielektrycznych D1, D2. Są one przymocowane jednym końcem do przewodu pod napięciem mierzonym U_s . Na drugim końcu każdego z elementów znajduje się elektroda (odpowiednio E1, E2). Elektrody są od siebie odseparowane galwanicznie.



Rys. 1. Proponowana konstrukcja czujnika z zaznaczonymi istotnymi pojemnościami i napięciami.

Fig. 1. Proposed sensor construction with important capacitances and voltages marked.

Zakładając pomijalnie wysoką rezystancję elementów dielektrycznych, z obwodowego punktu widzenia układ stanowią dwa dzielniki pojemnościowe, których elementy $C_1 - C_4$ zaznaczono na rysunku linią przerywaną.

Zakładając identyczne wymiary elementów D1 i D2 oraz elektrod E1 i E2, pojemności C_3 i C_4 między elektrodami a ziemią mają niemal identyczne wartości, co pozwala zapisać je jako C_d :

$$C_d = C_3 = C_4. \quad (1)$$

Tym samym napięcia wyjściowe dzielników U_1 i U_2 są opisane równaniami:

$$U_1 = U_s \frac{C_d}{C_1 + C_d}, \quad (2)$$

$$U_2 = U_s \frac{C_d}{C_2 + C_d}. \quad (3)$$

Warto podkreślić, że napięcia U_1 i U_2 są napięciami pomiędzy elektrodą a szyną pod napięciem. Ma to istotne znaczenie dla opisanej dalej konstrukcji systemu transmisji danych z czujnika. W równaniach (2) i (3) wartości C_1 i C_2 są znane, a wartości U_s oraz C_d podlegają wyznaczeniu:

$$U_s = (U_2 - U_1) \frac{C_1 C_2 + C_1 C_d + C_2 C_d + C_d^2}{C_1 C_d - C_2 C_d}, \quad (4)$$

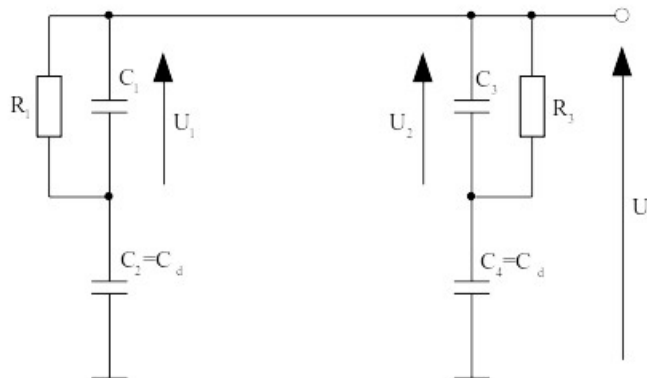
$$C_d = \frac{U_1 C_1 - U_2 C_2}{U_2 - U_1}. \quad (5)$$

Tym samym proponowany czujnik pozwala odczytywać poprawne wartości napięcia bez konieczności kalibrowania w miejscu instalacji, pod warunkiem poprawnego wyznaczenia wartości C_1 i C_2 . Oczywiście jeżeli z jakichś powodów wyznaczenie tych pojemności nie jest możliwe w warunkach laboratoryjnych, kalibracja powinna być przeprowadzona podczas instalacji i polega właśnie na wyznaczeniu wartości C_1 i C_2 .

Układ równań (2) i (3) jest poprawnie określony tylko wtedy, gdy zachodzi nierówność $C_1 \neq C_2$. Założono jednak, że dla uzyskania $C_3 = C_4$ konieczne jest zrównanie wszystkich wymiarów elementów dielektrycznych i elektrod. Oznacza to, że jedynym sposobem zróżnicowania pojemności C_1 i C_2 jest zbudowanie elementów D1 i D2 z materiałów o możliwie różnych współczynnikach przenikalności dielektrycznej.

2.1. Model obwodowy

W praktycznym zastosowaniu obwód z rysunku 1 musi zostać uzupełniony o elementy pozwalające na odczyt wartości napięcia. W najprostszym przypadku oznacza to wprowadzenie dodatkowych obciążeń. Mogą one zostać wprowadzone tylko w gałęziach pojemności C_1 i C_2 lub dodatkowo na przekątnej. Pierwszy przypadek odpowiada sytuacji, gdy napięcia U_1 i U_2 są mierzone a napięcie na przekątnej $U_p = U_2 - U_1$ wyznaczone na ich podstawie. Drugi przypadek odpowiada bezpośredniemu pomiarowi U_p jednocześnie z pomiarem U_1 i U_2 . Schemat dla pierwszego przypadku przedstawia rysunek 2. Dodano na nim rezystancje R_1 i R_3 połączone równolegle z pojemnościami C_1 i C_3 . Rezystancje te modelują rezystancje obwodów wejściowych przyrządu użytego do rejestracji napięć U_1 i U_2 . W modelu nie dodano pojemności obwodów wejściowych, gdyż ich wartości dodają się do wartości połączonych z nimi równolegle pojemności C_1 i C_2 . Należy jednak mieć to na uwadze i odpowiednio zmodyfikować wartości w równaniach przedstawionych poniżej (odpowiednio (6) i (7) lub (8) i (9)).



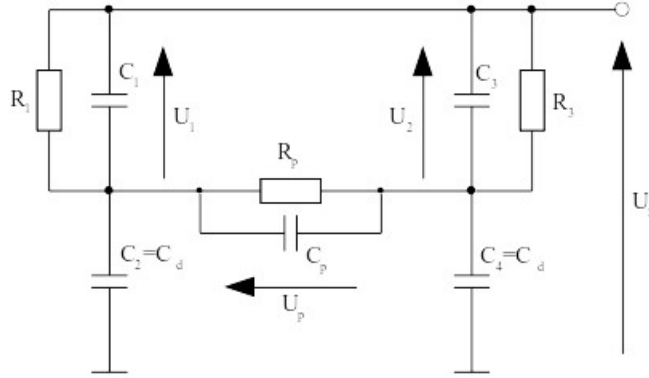
Rys. 2 Schemat obwodu z uwzględnieniem obciążenia przez wejścia aparatury
Fig.2 Schematic of a circuit involving loading by instrumentation inputs

Po uwzględnieniu obciążeń w modelu, równania opisujące pojemność doziemną C_d i napięcie wejściowe U_s przyjmują postać:

$$U_s' = \frac{G_1 U_1 U_2' - G_3 U_2 U_1' + C_1 U_1' U_2' - C_3 U_1' U_2'}{C_1 U_1' - C_3 U_2' + G_1 U_1 - G_3 U_2}, \quad (6)$$

$$C_d = \frac{C_3 U_2' - C_1 U_1' + G_3 U_2 - G_1 U_1}{U_1' - U_2'} \quad (7)$$

Na rysunku 3 przedstawiono model obwodowy dla sytuacji, gdy dodatkowo dokonywana jest bezpośrednia rejestracja napięcia różnicowego $U_p = U_2 - U_1$.



Rys.3 Schemat obwodu z uwzględnieniem dodatkowego obciążenia przy pomiarze różnicy napięć
Fig3. Schematic of a circuit involving additional load by measuring voltage difference.

W takim przypadku układ stanowi pełny mostek Wiena, z obciążeniem przekątnej elementami R_p i C_p . Pojemność rejestratora została uwzględniona wprost, jako że jej wartość nie dodaje się do żadnego istniejącego elementu obwodu. Równania na pojemność C_d i napięcie wejściowe U_s po uzupełnieniu czujnika o rejestrację napięcia U_p przyjmują postać:

$$U_s' = \frac{G_3 U_2 U_1' - G_1 U_1 U_2' + G_p U_p (U_1' + U_2')}{C_3 U_2' - C_1 U_1' + 2C_p U_p' - G_1 U_1 + G_3 U_2 + 2G_p U_p} + \frac{(C_3 - C_1) U_1' U_2' + C_p U_p' (U_1' + U_2')}{C_3 U_2' - C_1 U_1' + 2C_p U_p' - G_1 U_1 + G_3 U_2 + 2G_p U_p} \quad (8)$$

$$C_d = \frac{C_3 U_2' - C_1 U_1' + 2C_p U_p' - G_1 U_1 + G_3 U_2 + 2G_p U_p}{U_1' - U_2'} \quad (9)$$

Z powyższych wzorów wynika, że dodanie elementów w przekątnej powoduje znaczny wzrost komplikacji równań. Zaletą bezpośredniego pomiaru napięcia U_p jest większa dokładność w porównaniu z wyliczeniem wartości jako różnicy napięć U_1 i U_2 . Zwiększenie złożoności równań opisujących U_s' i C_d spowoduje jednak wprowadzenie dodatkowych błędów numerycznych. Skutkiem może być

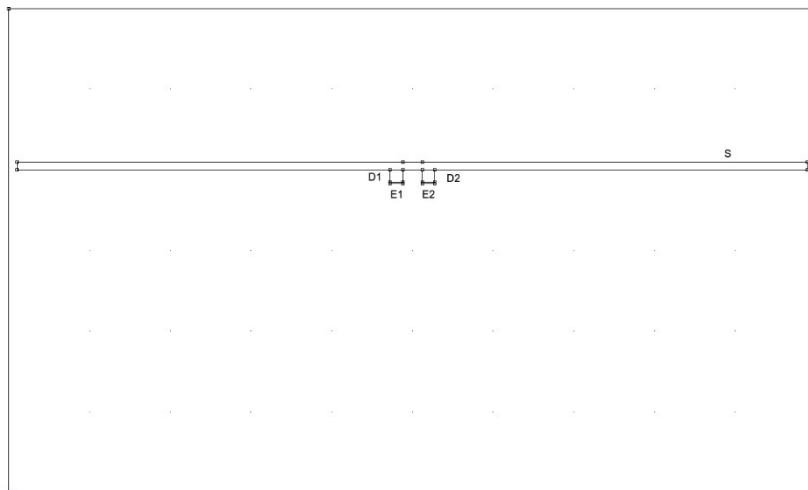
pogorszenie dokładności pomiaru pomimo dokładniejszego wyznaczenia U_p . W związku z tym przy budowie czujnika do eksperymentów pozostano przy pomiarach bezpośrednich wyłącznie napięć U_1 i U_2 .

3. BADANIA MODELOWE

Przeprowadzone badania modelowe objęły szereg symulacji metodą elementów skończonych. Miały one na celu wstępną weryfikację koncepcji czujnika, określenie wartości pojemności, których należy oczekiwać po skonstruowaniu prototypu oraz dobraniu współpracujących elementów do rejestracji napięć.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania FEMM [7], dla modeli elektrostatycznych. FEMM jest otwartym oprogramowaniem przeznaczonym do symulacji metodą elementów skończonych wyłącznie modeli dwuwymiarowych (planarnych). Użycie modelu elektrostatycznego w miejsce modelu elektromagnetycznego jest uzasadnione faktem, że w badanym zakresie częstotliwości system pracuje w polu bliskim. Dodatkową zaletą jest możliwość łatwego wyznaczenia pojemności.

Chcąc wykorzystać FEMM do wyznaczenia pojemności można modelowi nadać określoną głębokość, tworząc model pseudotrójwymiarowy. Ograniczenia narzucone przez oprogramowanie wpłynęły na kształt przygotowanego modelu. Ma on postać przedstawioną na rysunku 4.



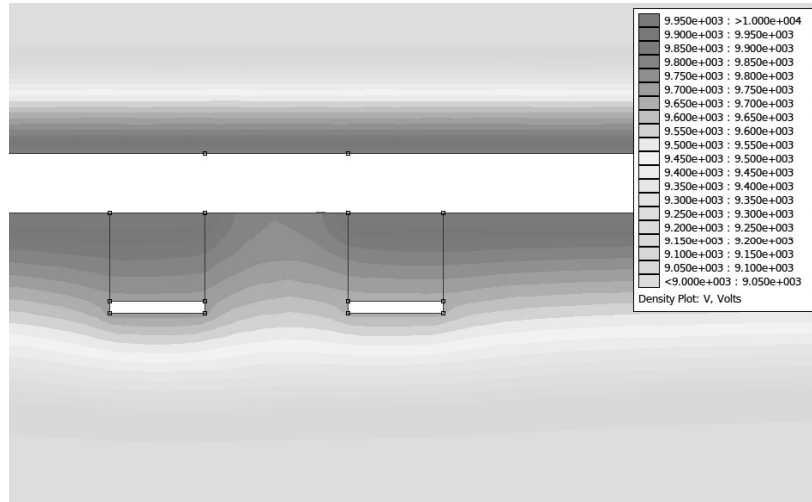
Rys.4 Model czujnika, szynoprzewodu i obudowy rozdzielni przeznaczony do symulacji metodą elementów skończonych. Obraz z programu FEMM z dodanymi oznaczeniami.

Fig.4 Model of a sensor, busbar, and switchgear walls developed for finite element method simulations. Image taken directly from FEMM program with added letter markings.

Model składa się z sześciu elementów. Pierwszym z nich jest prostokątny blok o potencjale określonym na 0. Modeluje on obudowę rozdzielni i jednocześnie definiuje dla modelu warunek brzegowy. Drugim elementem jest szyna oznaczona na rysunku 4 jako S. Jest ona zamodelowana jako element przewodzący, o stałym napięciu 10 kV. Kolejne dwa elementy modelu reprezentują elementy dielektryczne czujnika D1 i D2. Są zadeklarowane jako prostokątne elementy dielektryczne o różnych współczynnikach przenikalności. Stykają się z jednej strony z szyną S a z drugiej ze słabo widocznymi na rysunku 4 elementami przewodzącymi reprezentującymi elektrody E1 i E2. Celem dodania tych elementów było umożliwienie pomiaru pojemności C_1 i C_2 oraz napięć na nich panujących.

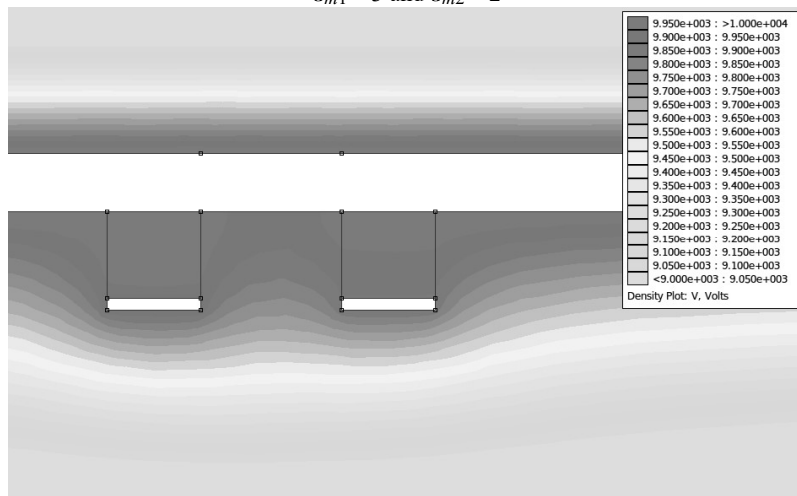
3.1 Wyniki badania metodą elementów skończonych

Badanie przeprowadzono dla dwóch różnych par wartości współczynników przenikalności dielektrycznej elementów D1 i D2. W pierwszym przypadku przyjęto $\epsilon_{m1} = 3$ oraz $\epsilon_{m2} = 2$. Odpowiada to zbudowaniu elementów dielektrycznych z powszechnie dostępnych tworzyw sztucznych. W drugim przypadku wartości współczynników zwiększono do $\epsilon_{m1} = 20$ i $\epsilon_{m2} = 10$. Odpowiada to zastosowaniu elementów szklanych i/lub ceramicznych. Na rysunkach 5 i 6 zestawiono rozkłady pola elektrycznego w otoczeniu i wnętrzu elementów przewodzących dla obu przypadków.



Rys.5 Potencjał pola w otoczeniu czujnika wyznaczony metodą elementów skończonych dla $\epsilon_{m1} = 3$ oraz $\epsilon_{m2} = 2$

Fig.5. Electric field potential in sensor surroundings calculated using finite elements method for $\epsilon_{m1} = 3$ and $\epsilon_{m2} = 2$



Rys.6 Potencjał pola w otoczeniu czujnika wyznaczony metodą elementów skończonych dla $\epsilon_{m1} = 20$ oraz $\epsilon_{m2} = 10$

Fig.6. Electric field potential in sensor surroundings calculated using finite elements method for $\epsilon_{m1} = 20$ and $\epsilon_{m2} = 10$

Można zauważyć istotną różnicę pomiędzy kształtami pola elektrycznego na rysunkach 5 i 6. Zarówno dla niskich, jak i wysokich wartości ϵ_m pole wykazuje tendencję do koncentrowania się w elementach D1 i D2. W przypadku niskich przenikalności dielektrycznych sprzężenie pojemnościowe między elektrodami E1 i E2 a szyną S w znacznym stopniu zachodzi jednak przez powietrze

w otoczeniu elektrod. W przypadku zastosowania elementów D1 i D2 zbudowanych z materiałów o wysokich współczynnikach przenikalności dielektrycznej, koncentracja pola w tych elementach jest znacznie bardziej widoczna a sprzężenie pojemnościowe zachodzi głównie przez elementy dielektryczne.

Obserwacje te potwierdzają wyznaczone wartości pojemności. W pierwszym przypadku (niska wartość ε_m , rysunek 5) pojemności wynoszą odpowiednio $C_1 = 2.115$ pF oraz $C_2 = 1.639$ pF. Dla przypadku drugiego (wysoka wartość ε_m , rysunek 6) pojemności rosną do $C_1 = 5.433$ pF oraz $C_2 = 10.155$ pF. Warto porównać proporcje wartości pojemności C_1/C_2 z ich wartościami teoretycznymi. Gdyby na pojemność wpływ miał wyłącznie materiał elementów D1 i D2, w pierwszym przypadku stosunek pojemności większej do mniejszej (C_1/C_2) wyniósłby dokładnie 150%. Wartości uzyskane w wyniku badań modelowych wykazują ten stosunek na poziomie 129%. W drugim przypadku można oczekiwać, że C_1/C_2 wyniesie 200%, podczas gdy uzyskany wynik wynosi 187%. W tym przypadku sprzężenie pojemnościowe przez otoczenie co prawda nadal występuje, jednak jego wpływ na wypadkowe pojemności jest znacznie niższy. Oznacza to, że wpływ sprzężenia pojemnościowego przez otoczenie czujnika można obniżyć dzięki skorzystaniu z materiałów o nie tylko zróżnicowanych, ale i wysokich wartościach współczynnika przenikalności dielektrycznej.

3.2 Wpływ obciążenia przez obwody pomiarowe

Wartości pojemności C_1 i C_2 wyznaczone w drodze badań modelowych, których wyniki przedstawiono w poprzednim podrozdziale wskazują, że układ będzie bardzo podatny na obciążenie rezystancyjne. Oznacza to, że konstruując obwód odczytu napięcia należy skorzystać ze wzmacniaczy o wysokiej impedancji wejściowej. Standardowo spotykana rezystancja wejściowa układów akwizycji danych na poziomie $10\text{ M}\Omega$ jest o wiele za niska dla omawianego zastosowania. W związku z tym konieczne jest zastosowanie odpowiednio dobranych do zastosowania wzmacniaczy. Wysokie napięcia U_1 i U_2 uzyskane w drodze badań modelowych (na poziomie kilkuset woltów) pozwalają oczekiwać, że nawet przy znacznym obciążeniu obwodu wartości napięć pozostaną na poziomach łatwych do wzmocnienia i przetworzenia analogowo-cyfrowego.

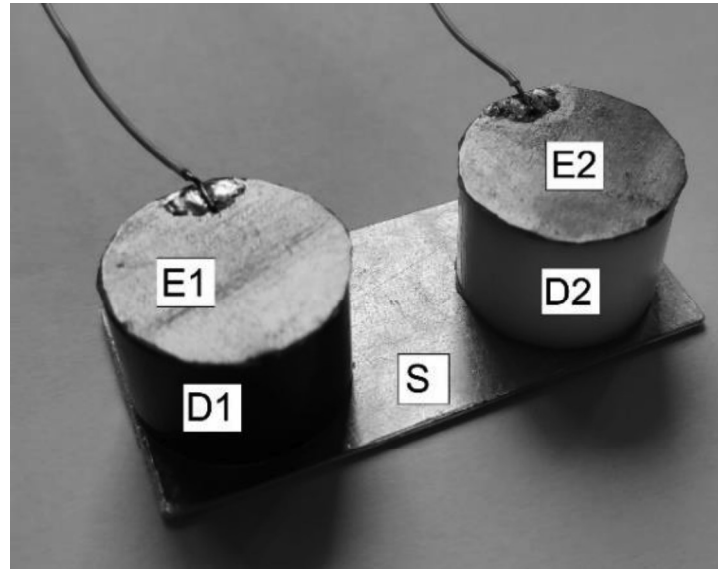
4. EKSPERYMENT

Przeprowadzony eksperyment miał na celu potwierdzenie koncepcji oraz wykrycie ewentualnych niedoskonałości czujnika. Dla potrzeb eksperymentu skonstruowano czujnik w postaci dwóch walcowych elementów D1 i D2 o jednakowej średnicy 10 mm, naklejonych na aluminiowej płytce stanowiącej wspólną elektrodę. Zastosowanie wspólnej elektrody pozwala na łatwe przyłączenie modelu czujnika do szyny pod napięciem. Element D1 został wykonany z poliksymetylenu (POM) o współczynniku przenikalności dielektrycznej $\epsilon_m = 3,7$ [8], a element D2 – z teflonu (poli(tetrafluoroetyleny), PTFE) o współczynniku $\epsilon_m = 2$ [9]. Otrzymane wartości współczynników są zbliżone do przyjętych w pierwszym przypadku badań modelowych, który dał mniej korzystne wyniki. Jest to spowodowane dostępnością materiałów w połączeniu z prostotą ich obróbki mechanicznej.

Elektrody E1 i E2 wykonano z okrągłych kawałków samoprzylepnej folii miedzianej naklejonych bezpośrednio na końce elementów dielektrycznych. Pozwoliło to w łatwy sposób dolutować wyprowadzenia do podłączenia obwodu pomiarowego. Czujnik przedstawia fotografia zamieszczona jako rysunek 7.

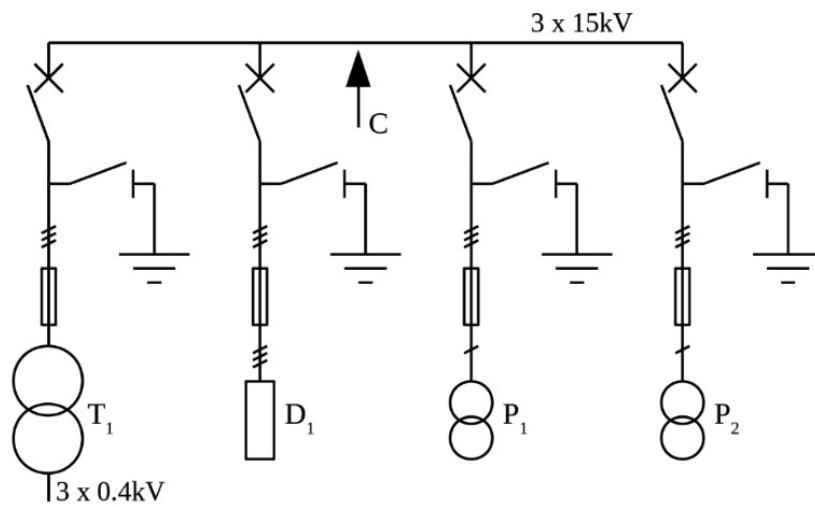
4.1 Rozdzielnia eksperymentalna

Eksperymenty przeprowadzono w rozdzielni eksperymentalnej AGH. Jest to rozdzielnia wnętrzowa o napięciu znamionowym 15 kV, wyposażona w transformator podnoszący napięcie. Dzięki temu rozdzielnia jest zasilana niskim napięciem, co daje pełną kontrolę nad napięciem rozdzielni bez konieczności stosowania elementów nastawnych pracujących przy średnim napięciu. Rozdzielnia jest wyposażona w cztery pola. W pierwszym z nich znajduje się transformator podnoszący napięcie. W drugim polu zainstalowano pojedynczych przekładnik laboratoryjny 15 kV/100V klasy 0,2. W trzecim polu znajduje się zespół trzech dzielników Ross VD30-12.5Y-A-KB-A o paśmie 1 MHz i niepewności na poziomie 1% w całym paśmie. Ostatnie pole jest przeznaczone do instalowania dowolnych elementów przeznaczonych do badań. Ponieważ czujnik jest przewidziany do instalacji na szynoprzewodzie, zdecydowano się na odkręcenie jednego z paneli obudowy i umieszczeniu czujnika poza polami rozdzielni, w sposób zgodny z przeznaczeniem czujnika. Schemat rozdzielni przedstawia rysunek 8.



Rys.7 Fotografia czujnika użytego w eksperymentach. Element D1 (czarny) wykonano z POM, element D2 (biały) – z PTFE.

Fig.7 Photo of a sensor used in experiments. Element D1 (black) is made of POM, element D2 (white) is made of PTFE

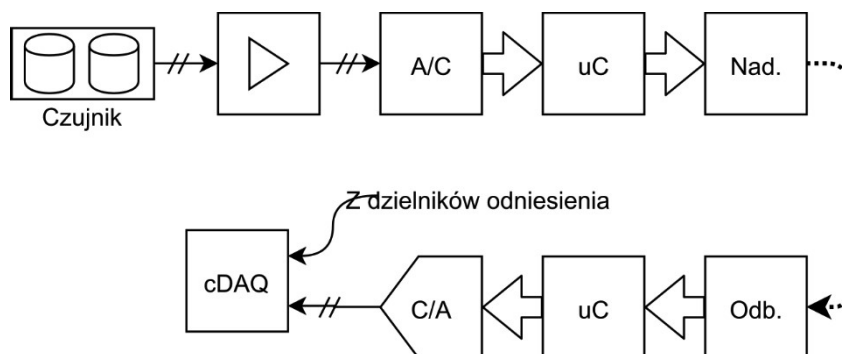


Rys.8 Schemat rozdzielni badawczej użytej w eksperymentach. Strzałka pokazuje przybliżone miejsce instalacji badanego czujnika na szynie 1.

Fig.8 Schematic of an experimental medium voltage switchgear used in experiment. Arrow points to an approximate location of a tested sensor on a busbar 1.

4.2. System rejestracji napięć i transmisji danych

Schemat blokowy systemu akwizycji napięć i transmisji danych przedstawiono na rysunku 9. Składał się on z pary wzmacniaczy o wysokiej impedancji wejściowej, stanowiących bufor dla przetwornika analogowo-cyfrowego. Zastosowano 10-bitowy przetwornik wbudowany w mikrokontroler PIC16, służący jednocześnie do transmisji danych. Rozwiązanie takie jest niedoskonałe z metrologicznego punktu widzenia, jednak celem eksperymentu nie było uzyskanie maksymalnej dokładności. Cały układ był zasilany z pary baterii 6F22 połączonych szeregowo tak, aby dostarczały napięcie bipolarne. Masa układu znajdowała się na szynie pod napięciem. Pozwoliło to w łatwy sposób uzyskać dodatnie i ujemne napięcie dla zasilania wzmacniaczy, przy jednoczesnym zagwarantowaniu separacji galwanicznej układu. Napięcia z baterii obniżano dodatkowo do wartości ± 5 V z wykorzystaniem scalonych liniowych regulatorów napięcia. Zapewniało to stabilne i niezależne od poziomu zużycia baterii wartości napięć zasilających układ elektroniczny. Do transmisji danych wykorzystano parę światłowodów z tworzywa sztucznego, przesyłając nimi bezpośrednio sygnały interfejsu SPI. Po stronie odbiorczej konieczne stało się zastosowanie kolejnego uproszczenia, w formie ponownej konwersji sygnału do postaci analogowej. Pozwoliło to zastosować do akwizycji sygnałów rejestrator napięć analogowych wspólny również dla wyjść dzielników referencyjnych stanowiska, kosztem dalszego pogorszenia jakości odtworzenia napięć. Widok czujnika zainstalowanego na przewodzie wraz z systemem rejestracji napięć i transmisji danych przedstawiono na rysunku 10.

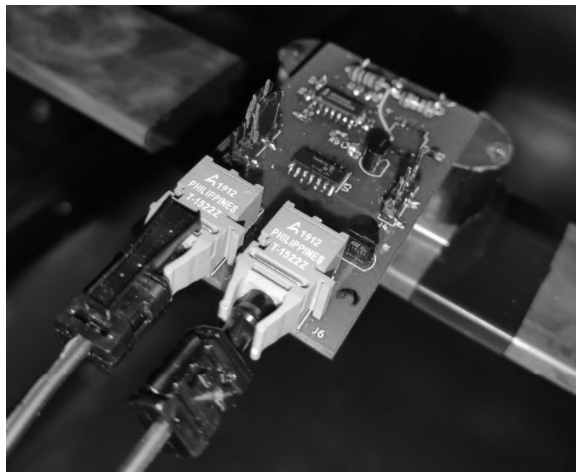


Rys.9 Schemat blokowy systemu rejestracji napięć i transmisji danych z czujnika.

Linia przerywana oznacza łącze światłowodowe.

Fig.9 Block diagram of a voltage acquisition and data transmission system.

Dashed line represents fiber-optic link.



Rys.10 Czujnik z systemem rejestracji i transmisji napięć zainstalowany w rozdzielni eksperymentalnej

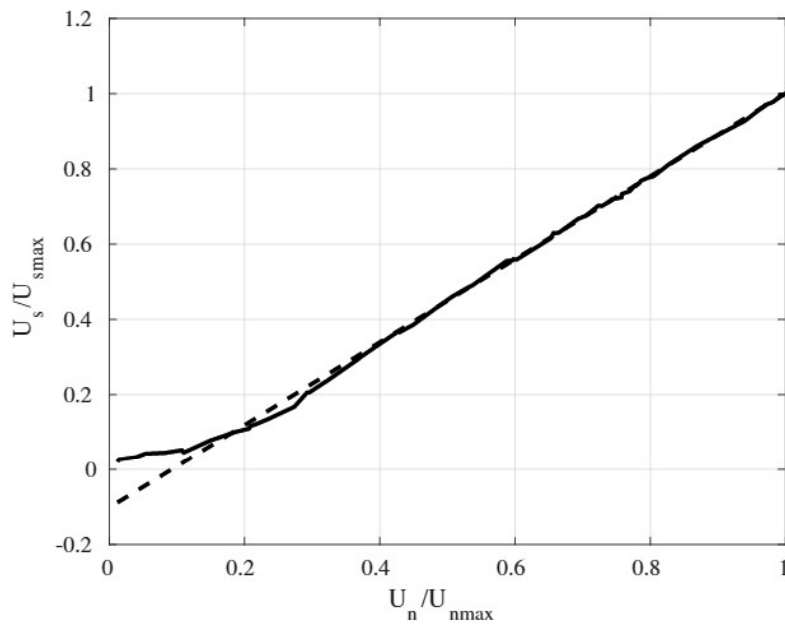
Fig.10 Sensor with voltage acquisition and transmission system installed on a busbar within an experimental switchgear.

4.3 Wyniki eksperymentu

W przeprowadzonym eksperymencie rejestrowano jednocześnie sygnały z czujnika zainstalowanego na szynoprzewodzie oraz z dzielnika napięcia przetwarzającego napięcie na tym samym szynoprzewodzie. Analiza widmowa odbieranego sygnału wykazała pojawienie się w nim drugiej harmonicznej, nie występującej w mierzonym napięciu. Sugeruje to występowanie nieliniowości toru przetwarzania. W związku z tym zmieniając napięcia w zakresie od 0 do 4 kV wyznaczono charakterystykę tego toru, którą przedstawiono na rysunku 11.

Z wyznaczonej charakterystyki wynika, że napięcie różnicowe czujnika odpowiada napięciu wejściowemu dopiero dla zakresu powyżej 30% wartości zbadanej, co odpowiada około 14% napięcia znamionowego rozdzielni. W celu zbadania przyczyny takiego zachowania systemu przeprowadzono dodatkowe badania przy niskim napięciu. Badania te polegały na zarejestrowaniu napięć wejściowych, wyjściowych bezpośrednio z czujnika oraz przetworzonych przez system przetwarzania napięć i transmisji danych. W ostatnich z wymienionych stwierdzono występowanie harmonicznych nie istniejących w pozostałych napięciach. Wskazuje to na nieliniowość systemu przetwarzania napięć i transmisji danych. Zaobserwowano też występowanie dodatkowych składowych w sygnałach rejestrowanych bezpośrednio na wyjściach czujnika. Stwierdzono, że są to zakłócenia odbierane z otoczenia wskutek zastosowania

wejść o wysokiej impedancji. Dodatkowe badania przeprowadzone przy niskim napięciu pozwalają stwierdzić, że koncepcję czujnika można uznać za potwierdzoną. Jednocześnie w celu prowadzenia dalszych badań konieczne jest skonstruowanie bardziej złożonego i dokładniejszego systemu przetwarzania napięć i transmisji danych z czujnika, a także przyłożenie większej wagi do ekranowania obwodów elektronicznych.



Rys.11. Wyznaczona (linia ciągła) oraz interpolowana (linia przerywana) charakterystyka czujnika dla zakresu 0-4kV

Fig.11. Measured (solid line) and interpolated (dashed line) sensor characteristic for range 0-4kV

5. PODSUMOWANIE

W publikacji zaprezentowano konstrukcję czujnika napięcia przeznaczonego do wykorzystania jako element niezależnego, zdalnego systemu pomiaru parametrów energii elektrycznej. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają poprawne działanie czujnika. Stwierdzono, że czujnik zachowuje liniowość dla napięć mierzonych powyżej 1,5 kV, a nieliniowość poniżej tej wartości wynika z niedoskonałości systemu transmisji danych oraz uproszczeń w analizie rozkładu pojemności. Przed rozpoczęciem bardziej złożonych eksperymentów konieczne będzie przeprojektowanie tego systemu w celu ograniczenia nieliniowości przetwarzania.

LITERATURA

1. Simkin D. C., Gerrard A., Gibson J. R., Jones G. R, Holt L. Measurements of power system voltages using remote electric field monitoring. IEE Proceedings online no 19981930.
2. Falvo M. C., Grasselli U., Lamedica R., Lampasi D. A., Maranzano G., Podest`a L.: PQ Events Measurement in an Electrified Metro-Transit System, IVT Influence Analysis. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden, June 11-15 2006.
3. Campbell B., Dutta P.: Gemini: A Non-invasive, Energy-Harvesting True Power Meter, 2014 IEEE Real-Time Systems Symposium, Rome 2014.
4. Wang W., Huang X., Tan L., Guo J., Liu H.: Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines, MDPI Energies, 9(4), 242, 2016.
5. Porcarelli D., Brunelli D., Benini L.: Clamp-and-measure forever: A mosfet-based circuit for energy harvesting and measurement targeted for power meters, 5th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces IWASI, IEEE 2013.
6. Porcarelli D., Brunelli D., Benini L.: Clamp-and-Forget: A self-sustainable non-invasive wireless sensor node for smart metering applications, Microelectronics Journal 45.12, 2014
7. Baltzis, K. B.: The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering, Journal of Engineering Science & Technology Review, Vol. 1, Issue 1, 2008
8. Luftl S., Chandran S. (red): Polyoxmethylene Handbook: Structure, Properties, Applications and Their Nanocomposites, Scrivener Publishing LLC, 2004, ISBN 978-1-118-38511
9. Ho P. S., Leu J., Lee W. W. (red): Low Dielectric Constant Materials for IC Applications, Springer Series in Advanced Microelectronics, Springer, 2003, ISBN 978-3-642-55908-2