AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Zastosowanie nowoczesnych obwodów wejściowych w konstrukcji kontrolnych liczników energii elektrycznej pracujących przy odkształconych przebiegach napięcia i prądu

Autor: **mgr inż. Piotr Makles**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH

Praca wykonana:

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Kraków, 2026

Spis treści

1. Wprowadzenie 2

2. Teza i cele badawcze 3

3. Najważniejsze wymagania prawne i metrologiczne liczników energii elektrycznej, określenie wymagań pomiarowych 4

4. Identyfikacja źródeł błędów pomiaru mocy i energii elektrycznej w wejściowych obwodach pomiarowych 5

5. Projekt i budowa wejściowych obwodów pomiarowych zapewniających niewielką wartość niepewności pomiaru energii elektrycznej w dużym zakresie zmian prądu i częstotliwości 8

6. Badania porównawcze zaprojektowanego układu obwodów pomiarowych z typowym rozwiązaniem stosowanym w licznikach energii elektrycznej 10

7. Wnioski i kierunki dalszych badań 14

Bibliografia 16

1. Wprowadzenie

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz rozwój systemów elektroenergetycznych powodują rosnące wymagania dotyczące dokładności i wiarygodności pomiarów energii elektrycznej. Szczególne znaczenie ma to w przypadku prosumentów, u których występuje dwukierunkowy przepływ energii czynnej oraz odbiorców przemysłowych, dla których oprócz energii czynnej rozliczana jest również energia bierna. Współczesne liczniki energii elektrycznej realizują zatem pomiar wielu wielkości elektrycznych, m.in. napięcia, prądu, mocy, energii oraz harmonicznych, a coraz częściej pełnią również funkcje związane z analizą jakości energii elektrycznej. Istotnym problemem metrologicznym jest zapewnienie wymaganej niepewności pomiaru w warunkach odbiegających od znamionowych. Wzrost ilości odbiorników nieliniowych powoduje coraz częstsze występowanie odkształconych przebiegów napięcia i prądu, zawierających wyższe harmoniczne. W takich warunkach pracy na właściwości metrologiczne licznika wpływają zarówno algorytmy pomiarowe, jak również właściwości analogowych obwodów wejściowych. Ograniczenia amplitudowe i częstotliwościowe tych obwodów mogą prowadzić do zniekształcenia mierzonych sygnałów, a w konsekwencji do zwiększenia niepewności pomiaru mocy i energii elektrycznej. Na wynik pomiaru wpływają również m.in. temperatura, zakłócenia elektromagnetyczne oraz poziom sygnału wejściowego. Szczególne znaczenie mają właściwości toru pomiarowego obejmującego analogowe obwody pomiaru napięcia i prądu oraz współpracujące z nimi przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C). Ograniczony zakres amplitudy i częstotliwości przetwarzanych sygnałów może powodować wzrost niepewności pomiaru, szczególnie w przypadku przebiegów silnie odkształconych oraz przy dużych zmianach wartości mierzonego napięcia i prądu. Z tego względu poprawa właściwości analogowych obwodów wejściowych jest jednym z istotnych kierunków rozwoju współczesnych liczników energii elektrycznej.

Istotnym ograniczeniem obecnych wymagań metrologicznych jest fakt, że weryfikacja parametrów liczników energii elektrycznej odbywa się przede wszystkim dla przebiegów sinusoidalnych. Obowiązujące wymagania prawne w ograniczonym zakresie odnoszą się do pracy urządzeń w warunkach odbiegających od znamionowych, w szczególności przy występowaniu silnych odkształceń napięcia i prądu [1, 2, 3, 4, 5]. Zagadnienia te mają znaczenie zarówno na etapie projektowania nowych konstrukcji, jak i podczas oceny rzeczywistych właściwości metrologicznych liczników. Istnieje zatem potrzeba opracowania metod umożliwiających ocenę wpływu odkształceń przebiegów oraz parametrów obwodów wejściowych na niepewność pomiaru wszystkich parametrów mierzonych przez liczniki energii elektrycznej.

W rozprawie autor podejmuje temat identyfikacji elementów liczników energii elektrycznej odpowiedzialnych za zwiększenie niepewności pomiaru w warunkach zaburzeń wpływających na analogowe obwody wejściowe. Przedstawione zostały rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające uzyskanie niewielkiej niepewności pomiaru przy pracy z silnie odkształconymi przebiegami napięcia i prądu oraz przy szerokim zakresie zmian amplitudy i częstotliwości sygnałów. Zaproponowano również przebiegi testowe umożliwiające porównawczą ocenę właściwości metrologicznych różnych rozwiązań konstrukcyjnych liczników energii elektrycznej. Przeprowadzone badania i opracowane rozwiązania stanowią podstawę do dalszych prac nad konstrukcją liczników rozliczeniowych i kontrolnych, zapewniających wiarygodny pomiar energii elektrycznej w warunkach występowania silnie odkształconych przebiegów oraz znacznych zmian wartości mierzonego napięcia i prądu.

2. Teza i cele badawcze

Przedmiotem działalności zawodowej autora jest projektowanie liczników energii elektrycznej. Podczas wielokrotnie przeprowadzanych badań nowo opracowanych konstrukcji, a także analizy przyczyn nieprawidłowej pracy liczników zainstalowanych w terenie, zaobserwowano przypadki niepoprawnych wyników pomiaru, których bezpośrednią przyczyną była wysoka zawartość harmonicznych. W takich sytuacjach istotny wzrost niepewności pomiaru jest zazwyczaj związany z właściwościami analogowych obwodów wejściowych oraz współpracujących z nimi przetworników analogowo-cyfrowych, w szczególności z ograniczonym zakresem amplitudowym i pasmem częstotliwościowym przetwarzanych sygnałów wejściowych. Na niepewność pomiaru sygnałów odkształconych istotny wpływ mają również różnice charakterystyk fazowych kanałów pomiarowych w całym paśmie częstotliwości. W celu identyfikacji przyczyn nieprawidłowego działania liczników rozliczeniowych niezbędne jest zastosowanie licznika kontrolnego umożliwiającego wiarygodny pomiar mocy i energii elektrycznej w warunkach znacznie odbiegających od wymagań normatywnych [4]. Z doświadczenia autora wynika, że nawet wysokiej jakości liczniki wzorcowe mogą, w warunkach silnego odkształcenia przebiegów, mierzyć energię z dużą niepewnością. W celu zapewnienia wiarygodnego pomiaru energii elektrycznej w takich warunkach niezbędne jest zatem opracowanie obwodów wejściowych zapewniających poprawną pracę toru pomiarowego w obecności tego typu zaburzeń. Istotne jest również określenie ograniczeń metrologicznych obwodów wejściowych stosowanych zarówno w licznikach rozliczeniowych, jak i kontrolnych. Uwzględniając powyższe aspekty oraz wyniki wielokrotnie przeprowadzanych badań, których celem była weryfikacja liczników w ramach procedur oceny zgodności z dyrektywą MID [1], sformułowano następującą tezę pracy:

Zastosowanie nowoczesnych konstrukcji obwodów wejściowych w licznikach energii elektrycznej umożliwia osiągnięcie niepewności pomiarowej poniżej 0,1% dla przebiegów sinusoidalnych, co stanowi podstawę do opracowania uniwersalnych liczników kontrolnych zdolnych do wiarygodnych pomiarów w warunkach silnie odkształconych sygnałów w szerokim zakresie napięcia, prądu i częstotliwości z niepewnością około 0,1%.

Aby zweryfikować postawioną tezę określone zostały następujące cele badawcze:

1. Analiza wymagań prawnych i metrologicznych dotyczących rozliczeniowych liczników energii elektrycznej.
2. Określenie wymagań pomiarowych stawianych licznikom rozliczeniowym i kontrolnym.
3. Analiza źródeł błędów pomiaru mocy i energii elektrycznej oraz ocena ich wpływu na całkowitą niepewność pomiaru.
4. Zdefiniowanie modelu matematycznego oraz algorytmów pomiaru mocy i energii elektrycznej.
5. Zaprojektowanie i wykonanie analogowych obwodów wejściowych zapewniających niewielką niepewność pomiaru oraz szeroki zakres amplitudowo-częstotliwościowy mierzonych sygnałów.
6. Przeprowadzenie badań opracowanych obwodów wejściowych w celu weryfikacji uzyskanych parametrów metrologicznych.
7. Opracowanie metodyki weryfikacji poprawności pomiaru mocy i energii elektrycznej w obecności przebiegów odkształconych oraz określenie niepewności pomiaru.

3. Najważniejsze wymagania prawne i metrologiczne liczników energii elektrycznej, określenie wymagań pomiarowych

Aby nowo wyprodukowany licznik energii elektrycznej czynnej mógł zostać wprowadzony do obrotu na terenie Unii Europejskiej, musi spełniać wymagania dyrektywy MID [1]. Stanowi ona podstawowy akt prawny określający wymagania metrologiczne dla przyrządów pomiarowych, w tym liczników energii elektrycznej czynnej przeznaczonych do rozliczeń odbiorców komunalnych i przemysłowych zasilanych z sieci niskiego i średniego napięcia (nN i SN). Kolejnym istotnym dokumentem określającym wymagania dotyczące układów pomiarowo-rozliczeniowych stosowanych w Polsce jest Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2022 r. w sprawie systemu pomiarowego [6]. Rozporządzenie to wymaga, aby do rozliczeń z odbiorcami zasilanymi z sieci nN oraz SN stosowane były liczniki klasy B lub C, zgodne z dyrektywą MID [1]. W przypadku pomiarów w sieciach WN i NN wymagane jest stosowanie liczników klasy 0,2S, zgodnych z normą PN-EN IEC 62053-22 [3]. Rozporządzenie określa również wymagania dotyczące pomiaru energii biernej, który musi być zgodny z normą PN-EN IEC 62053-24 [5]. Powyższe dokumenty stanowią podstawę do określenia wymagań, jakie należy uwzględnić podczas projektowania nowych konstrukcji liczników energii elektrycznej. Odwołują się one również do szeregu innych norm i przepisów określających wymagania dotyczące właściwości metrologicznych, konstrukcji, bezpieczeństwa oraz warunków pracy liczników. Istotnym dokumentem prawnym jest również dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2026/706 z dnia 11 marca 2026 r., zmieniająca dyrektywę 2014/32/UE w odniesieniu m.in. do liczników energii elektrycznej [7]. Wprowadza ona zmiany dotyczące wymagań odnoszących się do liczników energii elektrycznej, a także innych przyrządów i systemów pomiarowych. Zawarte w niej przepisy mają obowiązywać w wszystkich państwach członkowskich UE od dnia 10 października 2028.

Na podstawie obowiązujących norm i przepisów określono parametry, jakie muszą spełniać uniwersalne obwody pomiarowe, które mogą być stosowane we wszystkich typach liczników energii elektrycznej dopuszczonych do rozliczeń. Określono także wymagania dla licznika kontrolnego umożliwiającego weryfikację niepewności pomiaru wszystkich liczników rozliczeniowych. Analiza wymagań wykazała, że obwody wejściowe muszą zapewnić dokładny pomiar w dużym zakresie zmian sygnałów wejściowych. Dotyczy to zwłaszcza kanałów pomiaru prądu. W przypadku liczników stosowanych do rozliczeń prądowe obwody pomiarowe mogą być przyłączane bezpośrednio lub przez przekładniki prądowe. Obwody wejściowe licznika kontrolnego powinny zatem umożliwiać wiarygodny pomiar w całym zakresie prądów występujących w układach pomiarowych stosowanych w licznikach rozliczeniowych. Z uwagi na konieczność pokrycia zakresu pomiarowego liczników przekładnikowych oraz bezpośrednich przyjęto, że licznik kontrolny powinien umożliwiać pomiar prądów w zakresie od 1 mA do co najmniej 80 A. Zakres pomiaru napięcia powinien natomiast obejmować wartości od minimalnego napięcia pracy liczników stosowanych w układach pośrednich wynoszącego 46,16 V ($0{,}8U_n$ dla napięcia znamionowego U_n = 57,7 V) do maksymalnego napięcia pracy liczników bezpośrednich wynoszącego 264,5 V ($1{,}15U_n$ dla napięcia znamionowego U_n = 230 V). W praktyce coraz częściej pojawia się wymaganie prawidłowej pracy przy wyższym napięciu. Wynika ono z konieczności zapewnienia poprawnego działania układów pomiarowych w instalacjach, w których napięcie może ulegać podwyższeniu, m.in. wskutek przyłączania odnawialnych źródeł energii. Jest to zatem istotne z punktu widzenia opracowania uniwersalnego toru pomiarowego przeznaczonego zarówno do liczników rozliczeniowych, jak i kontrolnych. Minimalny zakres częstotliwości przenoszonych sygnałów określono od 49 Hz do 2 kHz.

4. Identyfikacja źródeł błędów pomiaru mocy i energii elektrycznej w wejściowych obwodach pomiarowych

Obwody wejściowe współczesnych liczników energii elektrycznej w każdej fazie posiadają dwa niezależne kanały pomiarowe, podłączone do dwóch przetworników A/C. Próbki napięcia i prądu zmierzone przez przetworniki są wykorzystywane do obliczania wszystkich wielkości elektrycznych rejestrowanych przez licznik. Do przetwarzania sygnału stosuje się procesory sygnałowe (ang. DSP *Digital Signal Processing)* wchodzące w skład tzw. przetworników pomiarowych. W obecnie produkowanych licznikach przeznaczonych do rozliczeń pomiar napięcia realizowany jest za pomocą rezystancyjnych dzielników napięcia. W kanale pomiaru prądu do najbardziej popularnych rozwiązań należą:

- rezystor bocznikowy (ang. *current shunt*),
- przekładnik prądowy (ang. *current transformer*) oraz rezystor bocznikowy.

Obliczanie energii czynnej przez procesor sygnałowy odbywa się poprzez sumowanie iloczynów próbek napięcia i prądu, pochodzących z tych samych chwil czasowych, według wzoru:

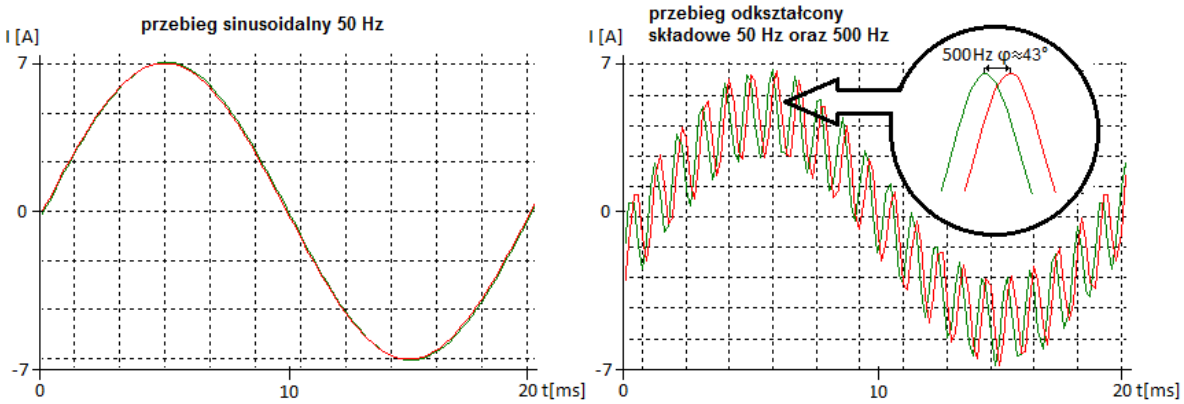
$$E_p = \sum_{n=TR_P}^{TR_K} u_n \cdot i_n \cdot \Delta t \qquad (1)$$

gdzie: u_n - próbka napięcia, i_n - próbka prądu, Δt - okres próbkowania, TR_P, TR_K - indeksy próbek odpowiadające początkowi oraz końcowi okresu pomiaru energii (początek i koniec okresu rozliczeniowego)

Błędy pomiaru energii elektrycznej rejestrowanej przez licznik można podzielić na błędy wynikające z działania analogowych układów wejściowych oraz błędy spowodowane cyfrowymi algorytmami przetwarzania sygnałów. Elementami w znacznym stopniu wpływającymi na niepewność pomiaru wszystkich parametrów mierzonych przez licznik są wejściowe obwody pomiarowe, składające się z analogowych obwodów wejściowych, przetworników A/C oraz układu cyfrowego przetwarzania sygnału, odpowiedzialnego za obliczanie wszystkich mierzonych wielkości. Największy wpływ na niepewność pomiaru mają jednak analogowe układy pomiaru napięcia i prądu. Główną przyczyną wzrostu niepewności pomiaru mocy i energii są zmiany wartości modułu oraz fazy napięcia i prądu występujące w analogowych obwodach wejściowych. Zmiany te wynikają z wielu czynników, takich jak rozwiązania konstrukcyjne, rozrzut parametrów zastosowanych elementów, zależność ich parametrów od poziomu i kształtu sygnału, a także wpływ dodatkowych czynników zewnętrznych, takich jak temperatura, proces starzenia się elementów czy zaburzenia elektromagnetyczne.

Najbardziej znaczący wpływ na pomiar ma wprowadzane przesunięcie fazy pomiędzy kanałami pomiarowymi napięcia i prądu. W przypadku mocy i energii czynnej zwiększa się on wraz ze zmniejszeniem współczynnika mocy. W celu wyeliminowania przesunięcia fazy wprowadzanego przez przetworniki A/C są one taktowane sygnałem zegarowym pochodzącym z tego samego generatora. Próbki u_n oraz i_n (wzór 1) pochodzą więc z tych samych chwil czasowych. Na niepewność pomiaru licznika wpływają zatem zmierzone wartości próbek napięcia i prądu oraz przesunięcie fazy wprowadzane przez wejściowe układy analogowe. W przypadku energii elektrycznej czynnej pomiar jest przeprowadzany w szerokim zakresie częstotliwości (w zależności od konstrukcji do ok. czterdziestej harmonicznej). Zaburzenia wprowadzane przez kanały pomiaru napięcia i prądu należy więc rozpatrywać w szerokim zakresie częstotliwości. Dla energii biernej wymagany

jest pomiar jedynie składowej podstawowej (rozporządzenie [6], norma [5]). Parametry częstotliwościowe obwodów pomiarowych determinuje więc pasmo pomiaru energii czynnej. Aby zmniejszyć wpływ zaburzeń modułu i fazy mierzonego przebiegu, którego źródłem są obwody wejściowe, w procesie produkcji liczników przeprowadza się adiustację układów pomiarowych. Obliczane są odpowiednie współczynniki korekcyjne, uwzględniane następnie w cyfrowych algorytmach przetwarzania sygnału. Dużym problemem jest jednak kompensacja przesunięcia fazowego wprowadzanego przez obwody pomiarowe. Najczęściej polega ona na opóźnieniu strumienia próbek w jednym z kanałów pomiarowych. Takie rozwiązanie jest jednak skuteczne tylko dla częstotliwości podstawowej. Na rysunku 1 pokazano zarejestrowane przebiegi sygnałów wejściowych po zastosowaniu tego typu korekcji. Pomiary wykonano dla przekładnika licznika bezpośredniego, który przy częstotliwości 50 Hz wprowadza przesunięcie fazy 4,35°. Aby skompensować takie przesunięcie fazy w kanale pomiaru napięcia wymagane jest zastosowanie opóźnienia wynoszącego 242 µs. Badany przekładnik dla częstotliwości 500 Hz charakteryzuje się przesunięciem fazy 0,4°, co przy wprowadzonym opóźnieniu 242 µs dla częstotliwości 500 Hz powoduje błąd fazy około 43°. Najskuteczniejszym sposobem zmniejszenia błędów wynikających z przesunięć fazy sygnału w kanałach pomiarowych napięcia i prądu jest zapewnienie jednakowego przesunięcia fazy w obu kanałach w szerokim zakresie częstotliwości. W takim przypadku wprowadzane współczynniki korekcyjne mają niewielkie wartości, co korzystnie wpływa na niepewność pomiaru przebiegów zawierających wyższe harmoniczne.



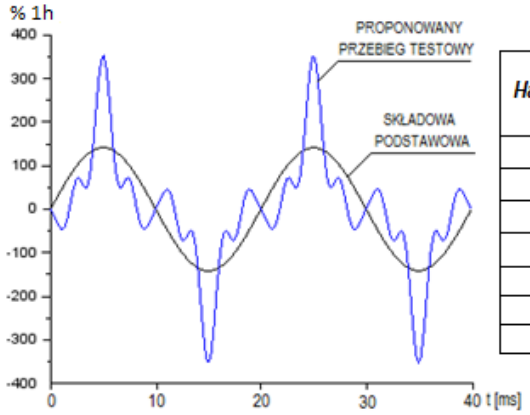
Rys. 1. Zarejestrowane przebiegi po korekcji fazy dla częstotliwości podstawowej przekładnika licznika bezpośredniego, kolor zielony - kanał pomiaru napięcia, kolor czerwony - kanał pomiaru prądu

Pokazane na rysunku 1 przebiegi dotyczą przekładnika prądowego do liczników bezpośrednich, który musi być odporny na składową stałą [2]. Odporność tę zapewnia zastosowanie przekładników wykonanych z użyciem rdzeni o dużej wartości indukcji nasycenia oraz niewielkiej przenikalności magnetycznej. Zastosowanie takich rdzeni wiąże się jednak ze znacznym przesunięciem fazowym. Bardziej korzystnie wypadają przekładniki stosowane w licznikach przekładnikowych, które nie są odporne na składową stałą. Wprowadzane przesunięcie fazy w tego typu elementach przeznaczonych do pomiarów w klasie 0,2S wynosi poniżej 0,2° dla częstotliwości 50 Hz. Przekładniki do liczników pośrednich charakteryzują się również mniejszymi zmianami parametrów spowodowanymi wpływem temperatury. Spośród stosowanych w produkowanych licznikach rozwiązań najlepsze charakterystyki częstotliwościowe posiadają obwody pomiaru prądu zrealizowane w oparciu o rezystory bocznikowe. Zapewniają one również niską niepewność pomiaru

w obecności składowej stałej. Składowa ta może jednak przesunąć poziom odniesienia elementów elektronicznych obwodów pomiarowych (np. wzmacniaczy), co może prowadzić do pracy w obszarze nieliniowym, niekorzystnie wpływając na pomiar. Boczniki charakteryzują się również licznymi wadami ograniczającymi ich zastosowanie w licznikach o największej precyzji pomiarów.

Zastosowanie w kanale pomiaru napięcia rezystancyjnych dzielników napięcia zapewnia dobre parametry pomiarowe w szerokim zakresie częstotliwości. Aby zapewnić niewielką niepewność pomiaru w dużym zakresie temperatur (od −40 °C do +70 °C dla liczników rozliczeniowych [2, 3]), istotne jest stosowanie elementów o niskim temperaturowym współczynniku zmian rezystancji (TCR ≤ 10 ppm/°C). Konieczne jest również takie umieszczenie elementów, aby temperatura wszystkich rezystorów dzielnika była jak najbardziej do siebie zbliżona. W przypadku zastosowania w dzielniku rezystorów o identycznych współczynnikach temperaturowych zmian rezystancji znajdujących się w jednakowej temperaturze niepewność pomiaru napięcia jest niewielka. W takim przypadku współczynnik podziału napięcia jest stały. W praktyce obserwuje się rozrzut parametrów rezystorów, nawet w obrębie tej samej partii produkcyjnej, co niekorzystnie wpływa na niepewność pomiaru.

W przypadku pomiarów w obecności silnie odkształconych przebiegów, przy odpowiednich wartościach modułów i faz poszczególnych harmonicznych, może wzrosnąć wartość chwilowa przebiegu, pomimo że jego wartość skuteczna pozostaje na poziomie nominalnym (zwiększa się współczynnik szczytu). W takich warunkach pracy problemem może być przekroczenie zakresu pomiarowego przetwornika A/C lub, w przypadku filtrów wejściowych wykonanych w oparciu o wzmacniacze operacyjne, wejście wzmacniaczy w obszar pracy nieliniowej. Występowanie takich warunków pracy powoduje znaczne zwiększenie niepewności pomiaru. W zależności od budowy obwodów wejściowych mogą wystąpić również inne niekorzystne zjawiska, takie jak: odwrócenie fazy sygnału wejściowego, zablokowanie przetwornika A/C, skutkujące wysyłaniem danych wyjściowych o stałej wartości (w niektórych przypadkach problem może występować również po powrocie mierzonych sygnałów do znamionowych parametrów), a także uszkodzenie elementów pomiarowych. W przypadku występowania tego typu przebiegów na wejściach napięciowych licznika może dojść również do uszkodzenia zasilacza. W celu sprawdzenia odporności zarówno obwodów wejściowych, jak i liczników energii elektrycznej, autor proponuje przedstawiony na rysunku 2 przebieg testowy o zawartości harmonicznych wynoszącej 85,44% oraz współczynniku szczytu równym 2,68.



Harmoniczna	*Wartość w stosunku do składowej podstawowej [%]*	*Faza początkowa [°]*
3	70	180
5	20	0
7	40	180
9	20	0
Współczynnik zawartości harmonicznych		85,44 %
Współczynnik szczytu		2,68

Rys. 2. Sygnał testowy do badania obwodów wejściowych w warunkach silnego odkształcenia mierzonego przebiegu

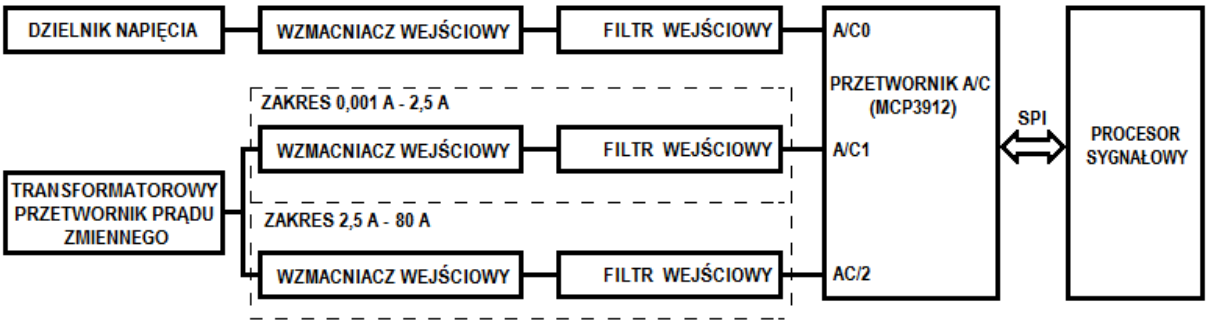
5. Projekt i budowa wejściowych obwodów pomiarowych zapewniających niewielką wartość niepewności pomiaru energii elektrycznej w dużym zakresie zmian prądu i częstotliwości

W obecnie produkowanych rozliczeniowych licznikach energii elektrycznej do najbardziej popularnych elementów pomiaru prądu należą boczniki oraz przekładniki prądowe podłączone do konwertera prąd-napięcie w postaci rezystora o wartości od kilku do kilkudziesięciu omów. Posiadają one liczne ograniczenia, które wpływają na niepewność pomiaru mocy i energii w szerokim zakresie częstotliwości oraz przy dużych zmianach amplitudy mierzonego prądu. Najdokładniejsze układy do pomiaru prądu wykorzystują zjawisko kompensacji strumienia magnetycznego w rdzeniu obejmującym przewodnik z mierzonym prądem. Taka kompensacja znacząco ogranicza zniekształcenia wynikające z nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia oraz zmniejsza wpływ temperatury na zmiany tej charakterystyki. Poprawia to dokładność pomiaru modułu prądu oraz zapewnia niewielką wartość wprowadzanego przesunięcia fazowego w szerokim zakresie częstotliwości, co korzystnie wpływa na niepewność pomiaru dla przebiegów o dużej wartości zmian mierzonego prądu w szerokim zakresie częstotliwości. W ramach rozprawy przebadano parametry czterech typów skompensowanych przetworników pomiaru prądu. Przeprowadzone badania miały na celu wytypowanie elementu o najbardziej korzystnych parametrach umożliwiających budowę liczników kontrolnych oraz rozliczeniowych zapewniających niewielką niepewność pomiaru dla dużego zakresu mierzonych prądów w szerokim zakresie częstotliwości. Przebadane zostały następujące rozwiązania:

- Zaprojektowany przez autora układ transformatorowego przetwornika prądu zmiennego.
- Przetwornik z czujnikiem Halla produkowany przez firmę LEM typu LB200-S/SP4 [8].
- Produkowany przez firmę Vacuumschmelze przetwornik z czujnikiem Fluxgate typu T60404-N4646-X461 [9].
- Produkowany przez firmę LEM przetwornik z czujnikiem Fluxgate CKSR 15-NP [10].

Przeprowadzone badania pokazują, że najlepszymi parametrami metrologicznymi w zakresie pomiarów energii elektrycznej prądu przemiennego charakteryzuje się transformatorowy przetwornik prądu zmiennego. Autor wybrał ten przetwornik do opracowania konstrukcji proponowanego w pracy rozwiązania umożliwiającego pomiary o małej niepewności mocy i energii elektrycznej. Niski poziom szumów oraz dobra liniowość umożliwiają pomiary w dużym zakresie prądów wejściowych (1:10000 dla jednego zakresu pomiarowego). Przetwornik ten charakteryzuje się również dobrymi parametrami przy pomiarach prądów o przebiegach sinusoidalnych w zakresie częstotliwości do kilku kHz, co zdaniem autora umożliwia uzyskanie dokładnego pomiaru mocy i energii sygnałów odkształconych. Układ pozwala również na prostą zmianę zakresu mierzonego prądu maksymalnego poprzez wymianę rezystora konwertera prąd-napięcie. Możliwa jest zatem budowa układu z zastosowaniem jednakowego obwodu pomiaru prądu w licznikach o różnych zakresach pomiarowych, w którym zakres zmienia się tylko jednym rezystorem (dla każdej fazy) montowanym na etapie produkcji lub przełączanym za pomocą kluczy elektronicznych na etapie konfiguracji urządzenia. Podstawową wadą układu jest konieczność zastosowania specjalnego transformatora pomiarowego zawierającego dwa uzwojenia wtórne oraz znaczny stopień złożoności obwodu sterującego pracą układu.

Schemat blokowy proponowanego rozwiązania pomiarowego przedstawiono na rysunku 3. Do pomiaru prądu zastosowano dwa przetworniki A/C pobierające próbki mierzonego przebiegu w tych samych chwilach czasowych. Zakres pomiarowy wynoszący od 1 mA do 80 A (wartość skuteczna przebiegu sinusoidalnego) został podzielony na 2 podzakresy od 1 mA do 2,5 A oraz od 2,5 A do 80 A. Wymagało to opracowania zarówno analogowych obwodów pomiarowych oraz cyfrowych algorytmów sterujących pracą układu. Podstawową zaletą rozwiązania jest pokrycie wszystkich zakresów pomiarowych współcześnie produkowanych liczników energii elektrycznej. Układ charakteryzuje się brakiem obwodów przełączania zakresu pomiarowego w torze analogowym, co korzystnie wpływa na niepewność pomiaru. Próbkowanie sygnałów z obu kanałów pomiarowych odbywa się równocześnie, natomiast wybór przetwornika A/C realizowany jest programowo. Jeżeli wartość próbki jest mniejsza od 3,53 A, co odpowiada maksymalnej wartości skutecznej przebiegu sinusoidalnego 2,5 A, do obliczeń pobierana jest próbka z przetwornika A/C1, w przeciwnym wypadku z A/C2. Zastosowany przetwornik A/C umożliwia również prostą implementację funkcji sygnalizacji przekroczenia zakresu pomiarowego napięcia i prądu licznika. Podczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że nie wszystkie stosowane w licznikach przetworniki A/C pozwalają na tego typu funkcjonalność.



Rys. 3. Schemat blokowy proponowanego układu wejściowych obwodów pomiarowych

Napięciowe obwody pomiarowe zrealizowano jako skompensowany częstotliwościowo rezystancyjny dzielnik napięcia. Zakres pomiarowy napięcia dla przebiegu sinusoidalnego wynosi od 0 V do 300 V (wartość skuteczna przebiegu sinusoidalnego), co spełnia wymagania stawiane obecnie produkowanym licznikom rozliczeniowym o napięciu znamionowym U_n = 230 V. Aby zapewnić możliwie niewielką niepewność pomiaru energii elektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości zastosowano aktywne filtry antyaliasingowe. Filtry zostały zaprojektowane tak, aby skompensować charakterystykę częstotliwościową toru analogowego oraz przetworników A/C w zakresie częstotliwości do 5,9 kHz. Zapewnia to płaską charakterystykę w określonym w wymaganiach projektowych paśmie pomiarowym wynoszącym 2 kHz. Aby umożliwić przeprowadzenie badań układu wejściowego, autor zaprojektował również konwerter cyfrowych interfejsów komunikacyjnych, umożliwiający podłączenie przetwornika A/C do komputera. Pozwoliło to na implementację algorytmów pomiarowych w napisanym przez autora oprogramowaniu sterującym i działającym pod kontrolą komputera PC.

6. Badania porównawcze zaprojektowanego układu obwodów pomiarowych z typowym rozwiązaniem stosowanym w licznikach energii elektrycznej

Celem opisanych badań było porównanie dwóch zaprojektowanych przez autora rozwiązań konstrukcyjnych wejściowych obwodów pomiarowych liczników energii elektrycznej. Przebadane zostały następujące konstrukcje:

- licznik 1 — opisany w rozprawie model licznika jednofazowego o rozszerzonym zakresie pomiarowym prądów wynoszący od 1 mA do 80 A zbudowany w oparciu o skompensowany transformatorowy przetwornik prądu zmiennego oraz przetwornik A/C MCP3912 [11],
- licznik 2 — jednofazowy licznik kontrolny klasy 0,1S zbudowany w oparciu o klasyczny przekładnik prądowy (dokumentacja w załączniku 3 dołączonym do rozprawy). W liczniku zastosowano scalony przetwornik energii typu ADE7880 [12]. Uzyskane parametry pozwalają uznać go za odpowiednik wysokiej klasy licznika energii elektrycznej przeznaczonego do pracy w pośrednich układach pomiarowych (wg przepisów do najbardziej wymagających pomiarów w sieciach WN i NN stosuje się liczniki w klasie 0,2S).

Badania metrologiczne obejmowały sprawdzenie niepewności pomiaru energii czynnej w warunkach przebiegów sinusoidalnych i odkształconych. Zostały one wykonane na stanowisku do badań liczników energii elektrycznej, dla którego oszacowana zdolność pomiarowa wynosi:

- dla przebiegów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz CMC_{1h} = 0,064 %,
- dla przebiegów zawierających składową podstawową oraz jedną harmoniczną od 2 do 23 $CMC_{2\div23h}$ = 0,354 %,
- dla przebiegów zawierających składową podstawową oraz jedną harmoniczną od 24 do 37 $CMC_{24\div37h}$ = 0,800 %.

Ponieważ wykorzystane stanowisko pomiarowe nie posiada licznika kontrolnego wszystkie pomiary wykonano w oparciu o metodę mocy i czasu. Przed wykonaniem pomiarów należało więc określić zdolność pomiarową stanowiska. Do jej oszacowania wykorzystano licznik wzorcowy typu RADIAN RD-33-201 który jest nadzorowany przez Główny Urząd Miar i posiada aktualne świadectwo wzorcowania dla pomiarów energii przebiegów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz. Dla przebiegów odkształconych, niezbędną do wyznaczenia zdolności pomiarowej stanowiska niepewność pomiaru licznika wzorcowego przyjęto na podstawie jego dokumentacji technicznej [13]. W badaniach metrologicznych liczników rozliczeniowych nie jest bowiem wymagane sprawdzenie niepewności dla przebiegów odkształconych, dlatego posiadany licznik wzorcowy nie posiada świadectwa wzorcowania w tym zakresie.

Tabela 1 zawiera wyniki przeprowadzonych badań dla energii czynnej w warunkach odniesienia. Ze względu na ograniczenia pomiarowe wykorzystanego do badań fantoma mocy badania przeprowadzono w zakresie prądów od 20 mA do 80 A. Zakres ten umożliwia budowę urządzenia obejmującego pełny przedział pomiarowy wszystkich liczników energii elektrycznej dopuszczonych do rozliczeń określony w rozporządzeniu [6]. Zakres pomiarowy rozwiązania przeznaczonego dla standardowych liczników przekładnikowych klasy 0,1S jest znacznie mniejszy, co można zauważyć na podstawie analizy wyników pomiarów dla licznika 2. Zaprezentowane w tabeli

pomiary wykonano dla napięcia sinusoidalnego o wartości (230 ± 0,01) V. Dla każdego punktu pomiarowego wykonano 10 pomiarów energii czynnej, na podstawie których wyznaczono błąd średni oraz odchylenie standardowe, wykorzystane następnie do obliczenia rozszerzonej niepewności pomiaru. Analizując zawarte w tabeli wyniki można zauważyć, że dla wartości prądów powyżej 20 A niepewność pomiaru przekracza założoną w tezie wartość 0,1%. Należy jednak podkreślić, że umieszczona w tabeli wartość uwzględnia również niepewność stanowiska pomiarowego dla którego oszacowana wartość CMC wynosi 0,064%. Ponieważ jest to zakres prądów odpowiadający licznikom bezpośrednim dla których wymagana jest klasa pomiaru C wg MID, gdzie błąd pomiaru w warunkach odniesienie nie może przekroczyć wartości 0,5% zastosowane rozwiązanie może być wykorzystane do sprawdzania niepewności pomiaru wszystkich rodzajów liczników rozliczeniowych. W całym badanym zakresie od 30 A do 80 A niepewność rozszerzona nie przekroczyła 0,2%.

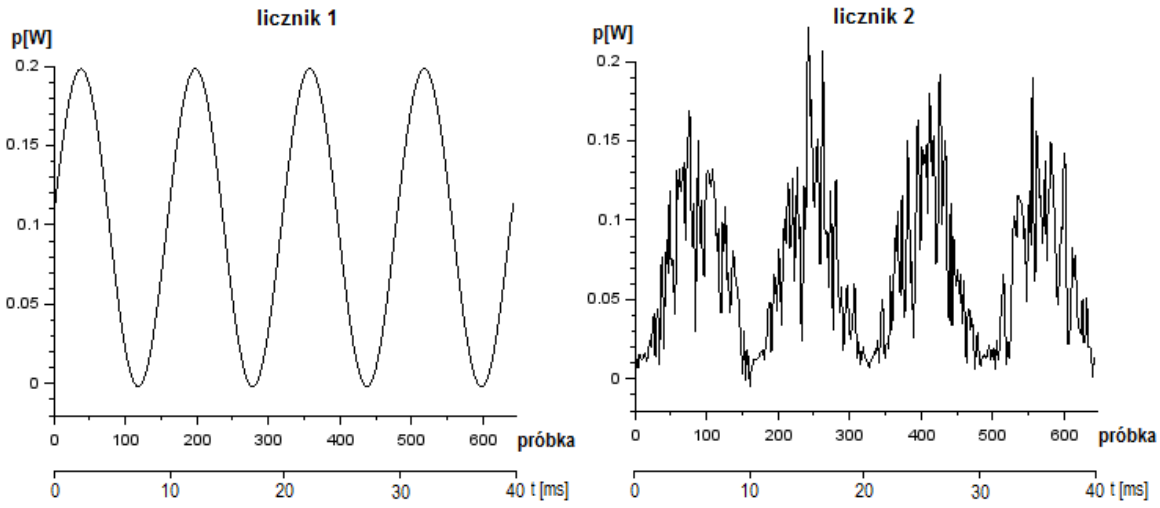
Tabela 1. Wyniki badań pomiaru energii czynnej w warunkach odniesienia

Prąd [A]	Licznik 1			Licznik 2		
	Błąd pomiaru energii [%]	Odchylenie standardowe [%]	Niepewność rozszerzona UNC_{MS} [%]	Błąd pomiaru energii [%]	Odchylenie standardowe [%]	Niepewność rozszerzona UNC_{MS} [%]
cosφ = 1						
0,02	0,184	0,002	0,064	0,054	0,014	0,075
0,05	0,058	0,001	0,064	0,077	0,013	0,074
0,1	0,019	0,002	0,064	0,074	0,001	0,064
0,5	-0,007	0,002	0,064	0,064	0,002	0,064
1	0,006	0,003	0,064	0,065	0,002	0,064
2,5	0,005	0,003	0,064	0,064	0,006	0,065
5	0,095	0,013	0,074	0,006	0,003	0,064
10	0,091	0,014	0,075	0,053	0,003	0,064
20	0,081	0,030	0,080	-	-	-
30	0,076	0,060	0,127	-	-	-
40	0,073	0,070	0,146	-	-	-
50	0,057	0,068	0,142	-	-	-
60	0,031	0,078	0,161	-	-	-
70	-0,004	0,079	0,163	-	-	-
80	-0,088	0,081	0,165	-	-	-
cosφ = 0,5						
0,02	0,246	0,003	0,064	-0,022	0,016	0,080
0,05	0,224	0,001	0,064	0,026	0,007	0,065
0,1	0,059	0,002	0,064	0,007	0,007	0,065
0,5	0,019	0,002	0,064	0,025	0,004	0,065
1	-0,007	0,003	0,064	-0,007	0,002	0,064
2,5	0,005	0,003	0,064	0,020	0,004	0,064
5	0,104	0,035	0,080	0,036	0,002	0,064
10	0,113	0,045	0,099	0,016	0,003	0,064
20	0,129	0,033	0,078	-	-	-
30	0,132	0,085	0,175	-	-	-
40	0,110	0,071	0,147	-	-	-
50	0,112	0,081	0,148	-	-	-
60	0,113	0,078	0,161	-	-	-
70	-0,109	0,084	0,173	-	-	-
80	-0,194	0,080	0,171	-	-	-

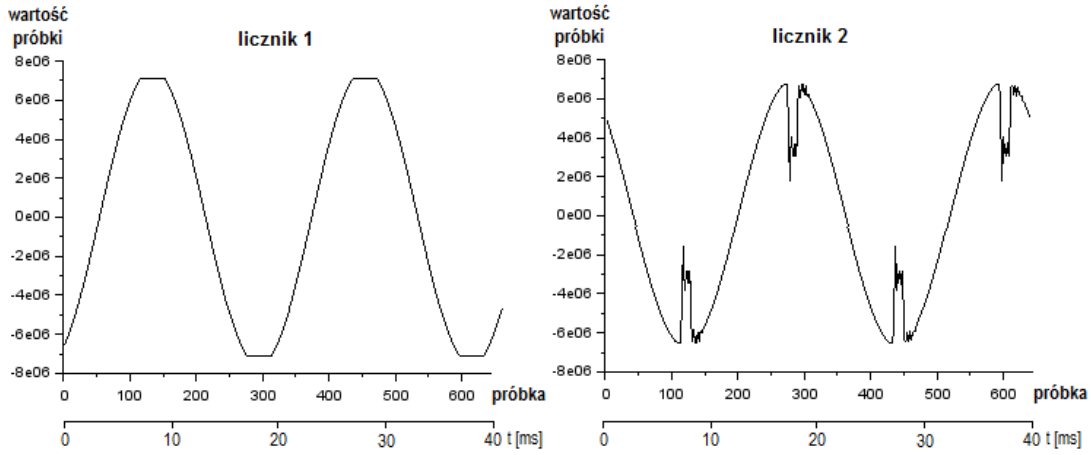
Proponowane rozwiązanie układowe w liczniku 1 charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami metrologicznymi w zakresie pomiaru małych wartości prądu. Na rysunku 4 pokazano przebiegi mocy dla sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz i skutecznych wartościach napięcia i prądu wynoszących odpowiednio 100 V i 1 mA. Można zauważyć, że przebieg mocy licznika 2 jest silnie zniekształcony, co powoduje ograniczenie użytecznego zakresu mierzonej mocy i energii.

Na rysunku 5 pokazano przebiegi prądu zarejestrowane przez przetworniki A/C, nieznacznie przekraczającego ich dopuszczalne wartości wejściowe. W przypadku układu MCP3912 (a także całej rodziny przetworników serii MCP39xx) [11] po przekroczeniu zakresu pomiarowego przetwornik

wystawia próbki o wartości +8388607 lub -8388608. Właściwość tę wykorzystano do wyboru zakresu pomiarowego prądu w liczniku 1, co pozwoliło rozszerzyć jego możliwości pomiarowe. Umożliwia ona również realizację funkcji sygnalizującej przekroczenie zakresu wejściowego przetworników. Tego typu funkcjonalność ułatwia wykrycie nieprawidłowego pomiaru energii w przypadku silnie odkształconych przebiegów wejściowych.



Rys. 4. Przebiegi mocy obliczone na podstawie próbek odczytanych z przetworników A/C dla prądu równego 1 mA oraz napięcia 100 V

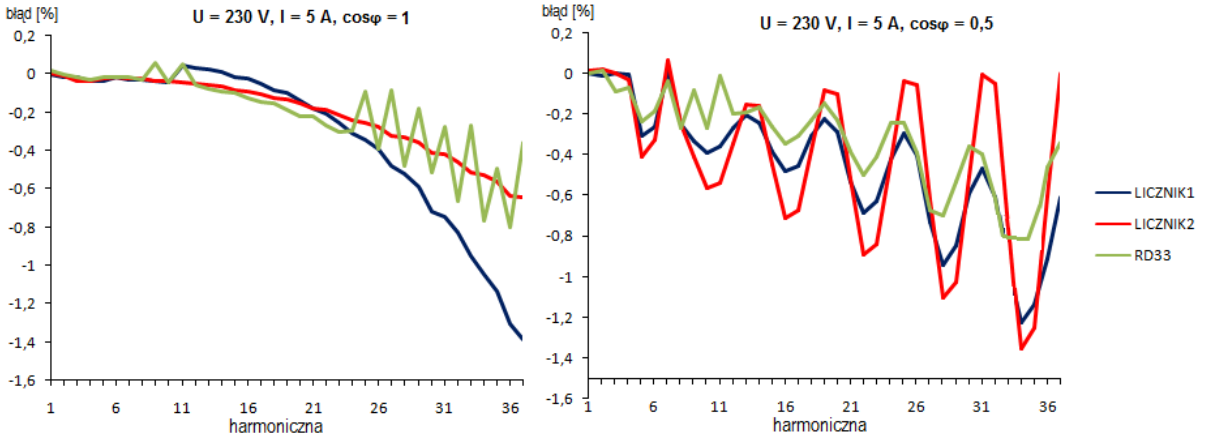


Rys. 5. Zniekształcenia przebiegów wejściowych spowodowane przekroczeniem zakresu pomiarowego przetwornika A/C

Rysunek 6 pokazuje charakterystyki pomiaru energii czynnej dla przebiegów odkształconych. Pomiary zostały przeprowadzone dla następujących parametrów napięcia i prądu:

- wartość skuteczna napięcia: 230 V,
- wartość skuteczna prądu: 5 A,
- wartość składowej harmonicznej przebiegu napięcia: 10% składowej podstawowej,
- wartość składowej harmonicznej przebiegu prądu: 40% składowej podstawowej,
- faza początkowa składowej harmonicznej względem składowej podstawowej: 0°.

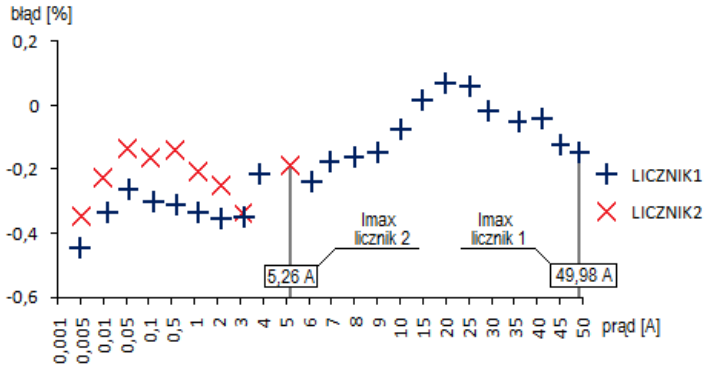
Pokazane na wykresach pomiary wykonano dla przebiegów napięcia i prądu zawierających składową podstawową oraz jedną harmoniczną z zakresu od 2 do 36.



Rys. 6. Charakterystyki pomiaru energii czynnej dla przebiegów odkształconych

Dla porównania kolorem zielonym zaznaczono charakterystykę pomiaru energii czynnej przez licznik wzorcowy RADIAN RD-33-201. Analizując wyniki pomiarów dla współczynnika mocy równego 1, można zauważyć, że do harmonicznej nr 8 wszystkie liczniki zachowują się podobnie. W przypadku licznika wzorcowego powyżej harmonicznej 24 zauważono znaczne zmiany mierzonych wartości. Należy podkreślić, że deklarowana przez producenta licznika wzorcowego klasa pomiarowa 0,01 odnosi się do przebiegów sinusoidalnych [13]. Pomiary przeprowadzone dla współczynnika mocy składowej podstawowej wynoszącego 0,5 charakteryzują się większą zmiennością. Jest to prawdopodobnie spowodowane niewielkimi różnicami fazy pomiędzy prądem i napięciem poszczególnych harmonicznych. Ze względu na brak dostępu do przyrządów pomiarowych pozwalających na precyzyjne określenie fazy początkowej poszczególnych harmonicznych nie przeprowadzono badań mających na celu ustalenie dokładnej przyczyny tego zjawiska.

Rysunek 7 przedstawia wykres zmierzonego błędu pomiaru energii czynnej w funkcji prądu dla silnie odkształconych przebiegów. W trakcie badań wykorzystany został przebieg testowy z rys. 2. Przeprowadzone pomiary zostały wykonane dla napięcia o wartości skutecznej wynoszącej 131,529 V (składowa podstawowa 100 V). Wartość ta zapewnia pracę w liniowej części charakterystyki torów pomiaru napięcia.



Rys. 7. Charakterystyki pomiaru energii czynnej dla silnie odkształconych przebiegów napięcia i prądu

Maksymalne wartości skuteczne poprawnie mierzonego napięcia i prądu dla zaproponowanego kształtu przebiegów testowych wynoszą U_{MAX} = 269,06 V, I_{MAX} = 49,98 A dla licznika 1 oraz U_{MAX} = 302,52 V, I_{MAX} = 5,26 A dla licznika 2. Przekroczenie tych wartości powoduje wejście obwodów pomiarowych w nieliniowy zakres pracy, co jest bezpośrednią przyczyną znacznego zwiększenia niepewności pomiaru mocy i energii.

7. Wnioski i kierunki dalszych badań

Analiza opisanych w rozprawie wymagań prawnych wskazuje, że największy nacisk na dokładność i precyzję pomiarów energii elektrycznej kładzie się dla przebiegów sinusoidalnych, przy zachowaniu liniowej pracy analogowych obwodów wejściowych i nie przekraczaniu maksymalnego zakresu pomiarowego przetworników A/C. Kontrola metrologiczna liczników podczas legalizacji (MID) oraz wzorcowania liczników klasy 0,2S odbywa się w ściśle określonych punktach charakterystyki pomiarowej. W takich badaniach parametry napięć i prądów, generowane przez precyzyjne zadajniki napięciowe i prądowe, stabilizowane są z dokładnością lepszą niż 0,05 %. W rzeczywistej sieci elektroenergetycznej taka sytuacja nie występuje, ponieważ przebiegi charakteryzują się znaczną zmiennością wartości chwilowych spowodowaną dużą liczbą urządzeń dołączonych do sieci o różnych charakterystykach obciążenia. Powoduje to zmianę amplitudy sygnałów ich fazy oraz odkształcenie napięć i prądów. Pomimo tego, od liczników energii elektrycznej oczekuje się poprawnego działania w całym deklarowanym zakresie warunków użytkowania oraz możliwie odpornego zachowania w warunkach odbiegających od znamionowych. Z tego względu autor uznaje za istotne opracowanie liczników kontrolnych oraz procedur umożliwiających porównanie różnych konstrukcji w przypadku przebiegów mocy zbliżonych do rzeczywistych. Realizacja tego celu wymaga zarówno odpowiednich regulacji prawnych, określających metody pomiarowe, jak i narzędzi diagnostycznych. W niniejszej rozprawie przeanalizowano różne rozwiązania konstrukcyjne oraz przeprowadzono badania, których efektem jest praktyczna realizacja analogowych obwodów wejściowych umożliwiających budowę mierników mocy i liczników energii elektrycznej o szerokim zakresie pomiarowym napięć i prądów oraz dużej zawartości harmonicznych. Zaproponowane układy mogą znaleźć zastosowanie zarówno w licznikach rozliczeniowych, jak i kontrolnych. Wiedza zdobyta podczas badań i symulacji umożliwia zrozumienie zjawisk zachodzących w obwodach pomiarowych oraz projektowanie układów o lepszych parametrach, zapewniających mniejszą niepewność pomiaru. Zaproponowane w pracy rozwiązania układowe, algorytmy oraz testowe przebiegi odkształcone mogą być wykorzystane do porównywania parametrów analogowych obwodów wejściowych, przetworników pomiarowych oraz liczników energii elektrycznej. Przeprowadzone badania pokazują, że w celu poprawnego pomiaru mocy i energii w warunkach silnie odkształconych przebiegów, których składowa podstawowa osiąga wartości bliskie maksymalnego zakresu pomiarowego licznika, konieczne jest stosowanie obwodów pomiarowych z odpowiednim zapasem amplitudowym. Maksymalna wartość sygnału przenoszonego bez zniekształceń zależy zarówno od wartości modułów poszczególnych harmonicznych, jak i od ich fazy. W przypadku kanałów pomiaru prądu duży zakres pomiarowy ma dodatkowo znaczenie z uwagi na znaczną różnicę pomiędzy prądem rozruchu a prądem maksymalnym, które licznik musi prawidłowo zmierzyć. Opisane w rozprawie badania oraz wykonane układy potwierdzają postawioną w pracy tezę. Cele badawcze zostały zrealizowane w zakresie określonym przyjętą metodyką badań. Podczas przeprowadzonych badań w obecności przebiegów odkształconych zidentyfikowano również kilka ograniczeń związanych z pracą stanowisk przeznaczonych do badań liczników energii elektrycznej. W przypadku przebiegów odkształconych, w niektórych punktach pracy zarówno zadajniki prądowo-napięciowe, jak i liczniki wzorcowe wykorzystywane do badań legalizacyjnych liczników rozliczeniowych pracowały nieprawidłowo. Jest to związane z faktem, że urządzenia te przeznaczone są przede wszystkim do przeprowadzania pomiarów w obecności przebiegów sinusoidalnych.

Za oryginalne elementy pracy należy uznać:

- Opracowanie sposobu zwiększenia zakresu pomiarowego z wykorzystaniem równolegle pracujących przetworników A/C o zakresie pomiarowym dla przebiegów sinusoidalnych wynoszącym od 1mA do 80 A (badania metrologiczne pomiaru energii czynnej przeprowadzono w zakresie od 20 mA do 80 A natomiast samego przetwornika prąd-napięcie w zakresie od 1mA do 80 A). Jest to rozwiązanie autorskie, które nie zostało dotychczas spotkane ani w znanych autorowi licznikach innych producentów, ani w przeanalizowanej literaturze dotyczącej budowy liczników energii elektrycznej.
- Zdefiniowanie proponowanych przebiegów do testowania właściwości obwodów pomiarowych liczników energii elektrycznej w obecności przebiegów silnie odkształconych.

Autor planuje dalsze prace mające na celu praktyczne wykorzystanie zdobytej wiedzy. Kolejne badania będą obejmowały następujące zagadnienia:

- Uproszczenie konstrukcji oraz zapewnienie identycznych, niezależnych od tolerancji elementów, charakterystyk analogowych filtrów wejściowych kanałów pomiaru napięcia i prądu zaprojektowanego przetwornika pomiarowego.
- Badania nad możliwością zastosowania zaprojektowanego przetwornika w seryjnie produkowanych licznikach rozliczeniowych.
- Opracowanie układu sygnalizującego przekroczenie wejściowego zakresu pomiarowego torów analogowych oraz jego implementacja w nowo projektowanych licznikach energii elektrycznej.
- Budowa trójfazowego licznika kontrolnego na bazie zaprojektowanego przetwornika o rozszerzonym zakresie mierzonych prądów. Rozwój oprogramowania komputerowego umożliwiającego analizę przebiegów zarejestrowanych przez przetworniki pomiarowe.
- Badania możliwości wykorzystania dynamicznej zmiany współczynników adiustacyjnych w celu zmniejszenia niepewności pomiaru.
- Badania porównawcze właściwości metrologicznych liczników rozliczeniowych różnej konstrukcji (różnych producentów) z wykorzystaniem zaproponowanych w pracy przebiegów testowych.
- Budowa układu umożliwiającego zapis i odtwarzanie rzeczywistych przebiegów występujących w sieciach elektroenergetycznych. Proponowane urządzenie pozwoli na badanie liczników w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Bibliografia

[1] Dyrektywa MID - Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/32/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku przyrządów pomiarowych. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej z dnia 29.03.2014

[2] Norma PN-EN 50470-3:2023:02. Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej. Część 3: Wymagania szczegółowe. Liczniki statyczne energii czynnej prądu przemiennego (klas A, B i C)

[3] Norma PN-EN IEC 62053-22:2021. Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej. Wymagania szczegółowe. Część 22: Liczniki statyczne energii czynnej prądu przemiennego (klas 0.1S, 0.2S, i 0.5S)

[4] Norma PN-EN IEC 62052-11:2021. Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej. Wymagania ogólne, badania i warunki badań. Część 11: Urządzenia do pomiarów

[5] Norma PN-EN IEC 62053-24:2021-05 Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej. Wymagania szczegółowe. Część 24: Liczniki statyczne energii biernej dla częstotliwości podstawowej (klas 0,5S, 1S, 1, 2 i 3)

[6] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie systemu pomiarowego. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej 2022, poz. 788. Warszawa, dnia 8 kwietnia 2022

[7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2026/706 z dnia 11 marca 2026 roku w sprawie zmiany dyrektywy 2014/32/UE w odniesieniu do instalacji pomiarowych do infrastruktury do ładowania pojazdów elektrycznych i do odmierzaczy sprężonego gazu oraz w odniesieniu do liczników energii elektrycznej, gazomierzy i ciepłomierzy

[8] www.lem.com: Current Transducter LB200-S/SP4 [dostęp: 2023 r.]

[9] www.vacuumschmelze.com: 100A Current Sensor Module T60404-N4646-X461

[dostęp: 2023 r.]

[10] www.lem.com: Current transducter CKSR xx-NP [dostęp: 2025 r.]

[11] www.microchip.com: MCP3912A [dostęp: 2025 r.]

[12] www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade7880.pdf

[dostęp: 2025 r.]

[13] www.radianresearch.com: RD-33 Dytronic Three Phase Standard [dostęp: 2024 r.]