

Leszek WYDŹGOWSKI¹, Marek ZIELIŃSKI¹, Cezary MIKOWSKI²

¹UMK W TORUNIU, WYDZIAŁ FIZYKI, ASTRONOMII I INFORMATYKI STOSOWANEJ W TORUNIU, ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

²APATOR SA, ul. Żółkiewskiego 21/29, 87-100 Toruń

Indukcyjny czujnik prądu w technologii PCB

Dr Leszek WYDŹGOWSKI

Absolwent Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. W 2010r. obronił pracę doktorską z dziedziny elektrotechniki. Od kilku lat współpracując z firmą APATOR SA zajmuje się układami pomiaru energii elektrycznej.



e-mail: lehu@fizyka.umk.pl

Dr hab. inż. Marek ZIELIŃSKI

Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał z wyróżnieniem w 1985 roku na Politechnice Gdańskiej. Stopień naukowy doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie elektroniki, specjalność – metrologia, nadała mu w roku 2000 Rada Naukowa Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Obecnie zajmuje się systemami pomiarowymi, pomiarami wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, pomiarem odcinka czasowego oraz wykorzystaniem układów programowalnych.



e-mail: marziel@fizyka.umk.pl

Mgr inż. Cezary MIKOWSKI

Ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Poznańskiej w roku 1990 i od tego czasu pracuje w Apator SA w Toruniu. Jest konstruktorem urządzeń pomiarowych (liczniki energii elektrycznej, ciepłomierze, wodomierze) i systemów szzyfrowanej wymiany danych oraz współautorem szeregu patentów i wzorów użytkowych z tym związanych. Laureat Nagrody Gospodarczej Prezydenta RP oraz wielu wyróżnień w konkursach oraz wystawach branżowych.



e-mail: Cezary.Mikowski@apator.com.pl

that this sensor technology is highly resistant to the external magnetic static and alternate disturbance field.

Keywords: current sensor, electrical energy meters.

1. Wstęp

Obecnie na całym świecie, przestarzałe, liczące już około 100 lat konstrukcje indukcyjnych liczników energii elektrycznej są wymieniane na nowoczesne liczniki elektroniczne. Elementem metrologicznym statycznych liczników mającym największy wpływ na dokładność pomiaru są czujniki prądu. Podstawowe parametry metrologiczne jakie muszą spełniać czujniki stosowane w licznikach energii wynikają z normy PN-EN 50470. Dla licznika klasy dokładności C, o prądzie minimalnym 0,15 A i prądzie maksymalnym 100 A całkowity błąd licznika nie może przekroczyć 1% z czego wynika, że dla tego zakresu błąd czujnika nie może przekroczyć wartości 1%. Z normy [1] wynika także prąd rozruchu o wartości 20 mA. Czujnik nie może ulec uszkodzeniu przy przepływie prądu 3 kA przez 10 ms. Zgodnie z normą dodatkowy błąd spowodowany wpływem zmiennego pola magnetycznego pochodzenia zewnętrznego o wartości 0,5 mT i częstotliwości sieci nie może przekroczyć 1%.

Ze względu na pojawienie się w ostatnich latach bardzo silnych magnesów neodymowych i liczne próby nielegalnego poboru energii przy użyciu tych magnesów, czujniki prądu muszą być dodatkowo odporne na zakłócenia wywołane silnymi stałymi polami magnetycznymi [2].

Obecnie najczęściej stosowanymi czujnikami do pomiaru prądu w licznikach energii elektrycznej są boczniki oraz przekładniki prądowe. Rzadziej stosuje się czujniki Halla oraz czujniki magneto-rezystancyjne. W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie cewkami Rogowskiego, które w szczególności znajdują zastosowanie w pomiarach dużych prądów.

2. Budowa czujnika

Prezentowany czujnik zbudowany jest z czterowarstwowej płytki obwodu drukowanego (rys. 1 i 2). Wewnętrzne warstwy płytki zaprojektowano w taki sposób, aby tworzyły tor prądowy o odpowiedniej geometrii (rys. 1). Ścieżki znajdujące się na warstwach zewnętrznych płytki poprowadzono w taki sposób aby utworzyły one uzwojenie wtórne przetwornika. W uzwojeniu tym indukuje się napięcie proporcjonalne do pochodnej prądu płynącego w torze prądowym. Sposób poprowadzenia ścieżek uzwojenia wtórnego został opracowany w taki sposób, aby indukowało się w nim napięcie zależne od prądu mierzonego, a kompensowane były sygnały pochodzące od zakłócających strumieni magnetycznych. Poglądowa budowa czujnika przedstawiona została na rysunku 1. Tor prądowy znajduje się w dwóch wewnętrznych warstwach obwodu. Prąd mierzony doprowadzany jest do jednej z warstw, w której przepływa ścieżką obwodu ukształtowaną

Streszczenie

Artykuł dotyczy indukcyjnego czujnika prądu do zastosowań w licznikach energii elektrycznej. Budowa czujnika oparta jest o technologię wytwarzania obwodów drukowanych. Elementem statycznego licznika energii elektrycznej, który ma największy wpływ na dokładność pomiaru energii jest czujnik prądu. Wynika to z bardzo dużej dynamiki, jaką musi posiadać ten czujnik, a także stosunkowo szerokiego pasma sygnału mierzonego. Ponadto w licznikach wielofazowych niezbędne jest zastosowanie izolacji galwanicznej pomiędzy torami prądowymi, a układem pomiarowym. W obecnych rozwiązaniach izolację galwaniczną najczęściej realizuje się za pomocą sprzężenia magnetycznego, które jest szczególnie podatne na zakłócenia zewnętrznymi stałymi i zmiennymi polami magnetycznymi. Stosowane są także konstrukcje ze sprzężeniem optycznym, ale ze względu na koszty rozwiązanie to występuje rzadko. Konstrukcja prezentowanego czujnika prądu oparta jest na wielowarstwowym obwodzie drukowanym. Tor prądowy oraz cewki pomiarowe tego czujnika skonstruowane zostały poprzez odpowiednie poprowadzenie mozaiki ścieżek wielowarstwowego obwodu drukowanego. Zastosowanie takiej technologii pozwala na tanią i prostą produkcję czujnika, jednocześnie zapewniając dużą powtarzalność. Dzięki odpowiedniemu poprowadzeniu toru prądowego oraz cewek pomiarowych, uzyskuje się znaczną odporność na zakłócenia zewnętrznymi polami magnetycznymi stałymi i zmiennymi.

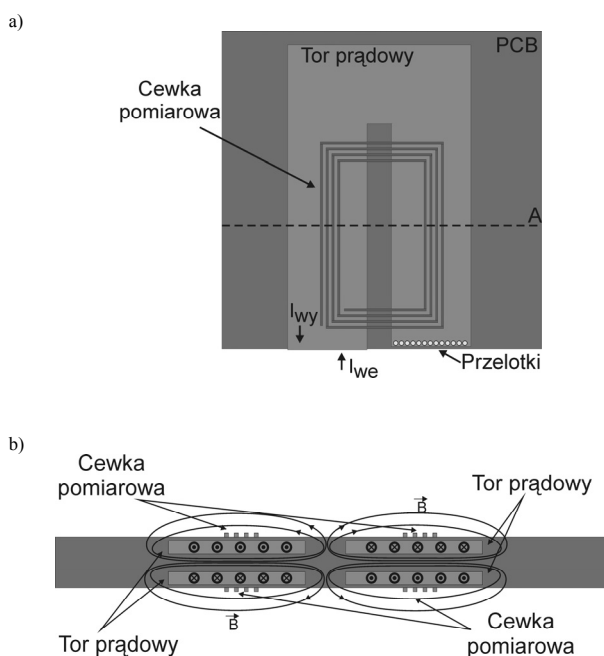
Słowa kluczowe: czujnik prądu, pomiar energii elektrycznej.

PCB inductive current sensor

Abstract

The paper deals with an inductive current sensor applied to watt-hour meters. Construction of this sensor is based on multilayer PCB (printed circuit board) technology. Current sensors have the biggest influence on the electronic energy meter accuracy because they must have very good dynamics and wide bandwidth of the measured current. There is used magnetic or optical coupling in current sensing methods to achieve galvanic insulation. However, the magnetic coupling is especially susceptible to external disturbing static and alternate magnetic field. The disadvantages of the optical coupling is its high cost and complex power supply. The presented current sensor is based on multilayer PCB technology. Current path and sensing coils of this sensor are made by appropriate arrangement of multilayer PCB tracks. Applying this kind of technology allows for chip and easy sensor production, and simultaneously provides high repeatability. On the basis of simulations and investigations performed, it can be stated

w kształt litery U, następnie za pomocą przelotek prąd przepływa do drugiej warstwy toru, która jest symetryczna do pierwszej i umieszczona równoległe do niej. Druga warstwa toru prądowego zakończona jest zaciskiem, przez który odprowadza się prąd wyjściowy. Rysunek 1b przedstawia przekrój czujnika wzdłuż linii A zaznaczonej na rysunku 1a. Geometria toru prądowego wymusza przepływ prądu w taki sposób, aby pole magnetyczne przezeń generowane miało rozkład przestrzenny, przedstawiony na rysunku 1b. W środkowej części czujnika wektory indukcji pola magnetycznego mają kierunek prostopadły do płaszczyzny płytki, przy czym zwrot wektorów po obu stronach płytki jest przeciwny. Uzwojenia wtórne (pomiarowe) znajdują się na zewnętrznych warstwach płytki i połączone są różnicowo tak, aby sygnały indukowane przez strumienie o przeciwnych zwrotach dodawały się, a sygnały pochodzące od strumieni o tym samym zwrocie przenikających obie cewki pomiarowe znosiły się. Ułożenie uzwojenia wtórnego oraz linie pola magnetycznego wytwarzane przez tor prądowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Czujnik planarny: a) widok z góry, b) przekrój poprzeczny płytki czujnika wzdłuż linii A

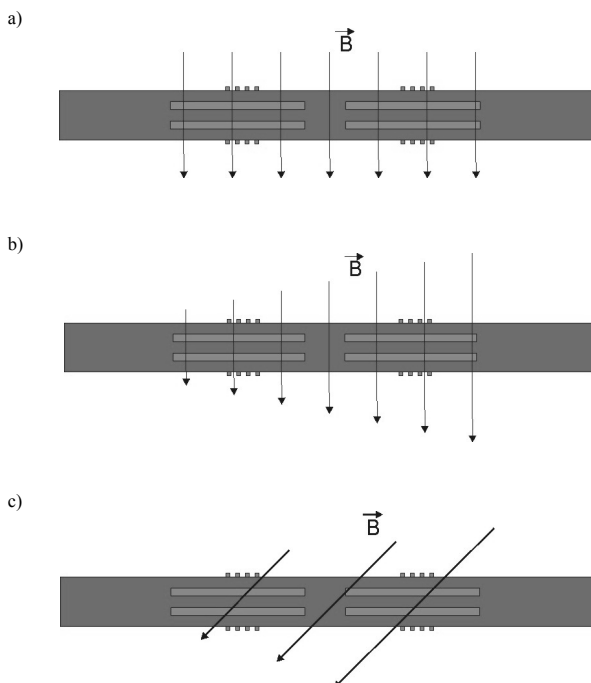
Fig. 1. Planar sensor: a) top view, b) sensor cross-section along A line

Wektor indukcji magnetycznej pochodzący z zewnętrznego źródła ma ten sam kierunek i zwrot dla obu cewek pomiarowych czujnika. W przypadku jednorodnego pola zakłócającego, napięcia indukowane w cewkach kompensują się, ponieważ przez obie cewki przepływa ten sam strumień magnetyczny. Sytuacja taka przedstawiona została na rysunku 2a. Podobnie jest dla przypadku przedstawionego na rysunku 2b gdzie pole zakłócające posiada gradient, ale zawiera tylko składową prostopadłą do powierzchni czujnika. W tej sytuacji strumień indukcji magnetycznej przenikający zarówno górną jak i dolną cewkę pomiarową ma tę samą wartość, przez co sygnał wyjściowy pochodzący od tego strumienia zostanie skompensowany.

Sygnał pochodzący od pól zewnętrznych, które posiadają gradient indukcji, a ich wektor indukcji nie jest prostopadły do powierzchni czujnika nie zostaną skompensowane całkowicie, ponieważ strumienie indukcji przenikające dolną i górną cewkę pomiarową będą się od siebie różniły. Stopień kompensacji zależy od kąta pomiędzy wektorem indukcji a powierzchnią płytki, oraz od gradientu indukcji pola, a także od odległości pomiędzy cewkami pomiarowymi. Sytuacja taka została przedstawiona na rysunku 2c.

Rozpatrując przypadek, w którym cewki pomiarowe mają identyczny kształt, pokrywają się idealnie ze sobą, a odległość między nimi wynosi zero, czujnik jest całkowicie odporny na zakłócające

zmienne pola magnetyczne, ponieważ przez obie cewki przepływa ten sam strumień, co prowadzi do kompensowania się sygnału indukowanego w cewkach. W skonstruowanym czujniku, w wewnętrznych warstwach, pomiędzy cewkami pomiarowymi znajduje się tor prądowy. Zapewnienie odpowiedniego przekroju toru prądowego oraz wystarczającej grubości warstwy izolacyjnej pomiędzy torem prądowym, a cewkami pomiarowymi prowadzi do powstania dystansu pomiędzy cewkami, przez co strumień pochodzący od źródła zakłócającego przenikający górną cewkę pomiarową ma inną wartość niż strumień przenikający cewkę dolną. W efekcie w sygnale wyjściowym z czujnika pojawi się pewna składowa związana z zakłócającym zmiennym polem magnetycznym.



Rys. 2. Kompensacja sygnału pochodzącego od zewnętrznego pola magnetycznego: a) jednorodne prostopadłe pole zakłócające, b) prostopadłe pole zakłócające posiadające gradient wzdłuż osi poziomej, c) pole zakłócające posiadające gradient wzdłuż osi poziomej i pionowej

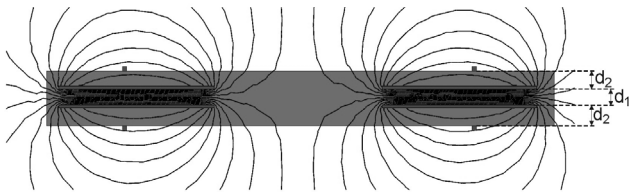
Fig. 2. Compensation of external magnetic field: a) homogeneous perpendicular disturbing field, b) perpendicular disturbing field with gradient along the horizontal axis, c) perpendicular disturbing field with gradient along the horizontal and vertical axis

3. Wyniki symulacji

Z analizy wpływu zewnętrznego zmiennego pola magnetycznego wynika, że należy zapewnić jak najmniejszą odległość pomiędzy cewkami pomiarowymi. Z drugiej strony należy zapewnić odpowiedni dystans pomiędzy warstwami toru prądowego, który znajduje się pomiędzy cewkami. W przypadku, gdy warstwy obwodu drukowanego zawierające tor prądowy znajdowałyby się bardzo blisko siebie, a więc odległość d_1 z rysunku 3 zmierzałaby do zera pole magnetyczne wytwarzane przez prąd płynący we fragmencie toru znajdującego się w górnej warstwie kompensowane byłoby przez prąd płynący w dolnej warstwie toru prądowego. Przyczyną kompensacji pola jest to, że kierunki przepływu prądu w obu warstwach toru są przeciwne. Im mniejsza jest odległość d_1 tym mniejszy jest efektywny strumień przepływający przez cewki pomiarowe i mniejszy sygnał wyjściowy. Zwiększenie tej odległości powoduje zwiększenie dystansu pomiędzy cewkami pomiarowymi, co przyczynia się do zmniejszania odporności na zakłócenia.

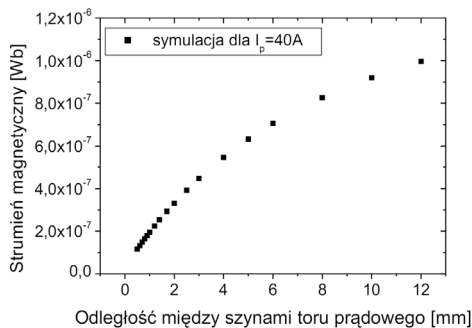
Rysunek 4 przedstawia zależność strumienia magnetycznego przenikającego przez jeden ze zwojów cewki od odległości d_1 pomiędzy warstwami tworzącymi tor prądowy. Symulacje zosta-

ły przeprowadzone dla prądu o wartości 40 A, odległość d_2 (cewek od torów prądowych) pozostawała stała. Na podstawie wyników symulacji można zauważyć, że wartość strumienia obejmowanego przez cewkę wzrasta wraz ze wzrostem odległości między ścieżkami toru prądowego. W celu ustalenia optymalnej odległości pomiędzy warstwami, torów prądowych przeprowadzono szereg symulacji, w których badano wartość sygnału użytecznego i odporność na zewnętrzne zmienne pola magnetyczne w zależności od odległości pomiędzy warstwami toru prądowego.



Rys. 3. Badanie wartości strumienia magnetycznego przenikającego cewki pomiarowe w zależności od dystansu pomiędzy warstwami toru prądowego

Fig. 3. Investigation of magnetic flux density depending on the distance between the current track layers



Rys. 4. Wartość strumienia magnetycznego przenikającego cewki pomiarowe w zależności od dystansu pomiędzy warstwami toru prądowego

Fig. 4. Value of the magnetic flux density in the measurement coil vs. distance between current track layers

Pomiar może być także zakłócony przez pole elektromagnetyczne wytwarzane przez pobliskie przewody wiodące prąd (tory pomiarowe sąsiednich faz, przewody zasilające lub celowo prowadzone przewody zakłócające). Dla różnych położenia przewodu zakłócającego względem czujnika sprawdzono zmianę strumienia przenikającego jeden ze zwojów cewki pomiarowej. Dwa z wielu badanych konfiguracji ustawień przewodu zakłócającego względem czujnika przedstawiono na rysunku 5. Odległość d_z przewodu zakłócającego od płytki czujnika ustalono na 5 mm. Symulacje zostały przeprowadzone dla prądu mierzonego oraz zakłócającego o wartości 40 A.

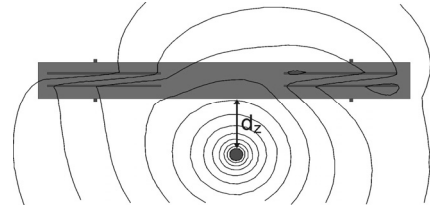
Rysunki 5a i b przedstawiają warunki symulacji dla dwóch położenia przewodu zakłócającego względem czujnika. Wyniki wpływu zakłóceń w zależności od odległości pomiędzy torami prądowymi przedstawione są odpowiednio na rysunkach 6a i b.

W przypadku sytuacji z rysunku 5a pomimo zwiększającej się odległości pomiędzy cewkami pomiarowymi, względna wartość błędu wprowadzanego przez strumień zakłócający zmniejsza się. Przyczyną tego jest jednoczesny wzrost wartości strumienia indukcji magnetycznej wytwarzanego przez tor prądowy.

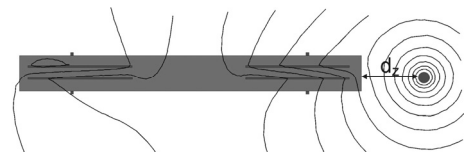
Rysunek 5b przedstawia symulację, w której zakłócające pole ma stosunkowo silny gradient, ale jego wektor indukcji jest prostopadły do powierzchni czujnika. Zgodnie z założeniami pole takie jest tym bardziej kompensowane im bliżej siebie znajdują się cewki pomiarowe. Względna wartość błędu wprowadzanego przez to pole wzrasta wraz ze wzrostem odległości pomiędzy cewkami.

Symulacje wykonane dla czujnika z podłączoną tylko jedną cewką pomiarową (górną lub dolną), wykazują, że błąd spowodowany zewnętrznym polem sięga 330%. Dzieje się tak, ponieważ przy pracy czujnika z tylko jedną cewką nie ma możliwości kompensacji pola zakłócającego. Ponadto ze względu na użycie tylko jednej cewki pomiarowej sygnał użyteczny jest dwukrotnie mniejszy.

a)



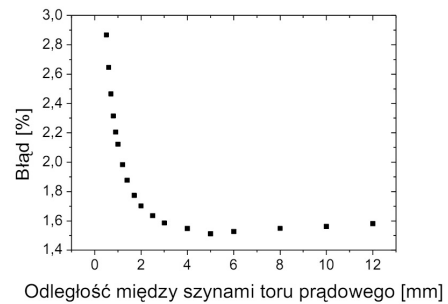
b)



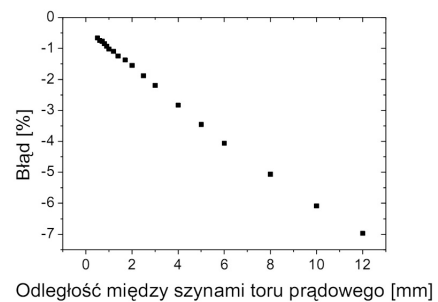
Rys. 5. Badanie odporności czujnika na wpływ zakłócającego zmiennego pola magnetycznego

Fig. 5. Investigation of sensor resistance to external disturbing magnetic field

a)



b)



Rys. 6. Wyniki badania odporności czujnika na wpływ zakłócającego zmiennego pola magnetycznego

Fig. 6. Sensor resistance to the external disturbing magnetic field

Tak jak zakładano różnicowe połączenie cewek pomiarowych i odpowiednie ich umieszczenie względem siebie znacznie kompensuje pole zakłócające.

Na podstawie dokonanych symulacji ustalono odległość pomiędzy warstwami toru prądowego na 1,5 mm. Ustalając tą odległość brano pod uwagę uzyskanie najlepszego stosunku wartości sygnału użytecznego do wpływu zakłóceń związanych z zewnętrznymi zmiennymi polami magnetycznymi, a także możliwości technologiczne wykonania obwodu drukowanego.

4. Wyniki pomiarów

Ze względu na to, że tor prądowy jest tworzony ze stosunkowo cienkiej warstwy miedzi oraz znajduje się w wewnętrznych warstwach obwodu (co utrudnia chłodzenie) należy zwrócić uwagę na jego obciążalność i wydzielaną moc.

Tor prądowy wykonanego czujnika ma grubość 180 μm . Jest to największa grubość wewnętrznych warstw obwodu obecnie oferowana przez producentów obwodów drukowanych. Szerokość ścieżki toru prądowego została obliczona zgodnie ze standardem IPC-2221 [3]. Dla grubości miedzi 180 μm prądu o wartości 40 A i dopuszczalnemu wzrostowi temperatury płytki o 50°C (dla temperatury otoczenia 25°C), minimalna szerokość ścieżki powinna wynosić 9,3 mm. W wykonanym czujniku szerokość ta wynosiła 9,5 mm. Całkowita długość toru prądowego skonstruowanego czujnika znajdująca się w wewnętrznych warstwach obwodu wynosi 230 mm. Dla tego przypadku moc wydzielana w torze prądowym wynosi około 4,5 W dla prądu 40 A.

Przeprowadzone pomiary odporności czujnika na zewnętrzne pola magnetyczne potwierdzają wyniki uzyskane na drodze symulacji, które przedstawione zostały w punkcie 2.

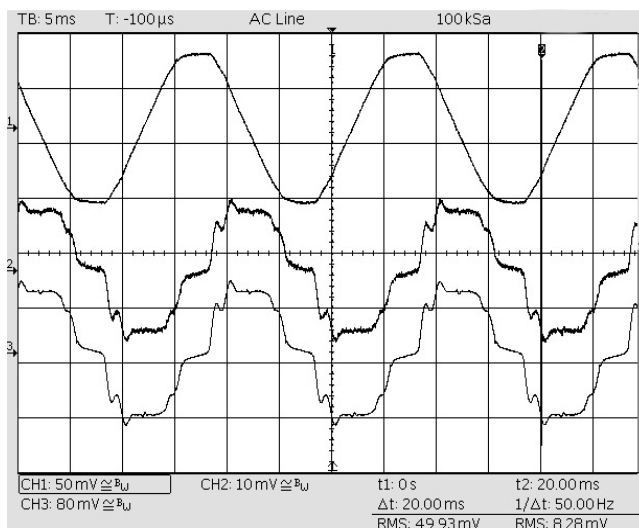
Rysunek 7 przedstawia oscylogram pomiaru prądu przemiennego o wartości skutecznej 50 A za pomocą bocznika rezystancyjnego (przebieg górny), omawianego czujnika planarnego (przebieg środkowy) i cewki Rogowskiego TR10LSH produkowanej przez TEAHWATRANS (przebieg dolny). Przebiegi uzyskane z czujnika planarnego i cewki Rogowskiego znacznie odbiegają od sinusoidy ponieważ sygnał z tego rodzaju czujników jest proporcjonalny do pochodnej mierzonego prądu w czasie (di/dt), a przedstawione przebiegi uzyskano dla odkształconego prądu mierzonego – rzeczywista sieć zasilająca NN i odbiornik RL. Różniczkowa zależność sygnału na wyjściu czujnika indukcyjnego od przetwarzanego prądu wymaga zastosowania całkowania w procesie pomiarowym, której to operacji tu nie zastosowano. Można ją realizować metodą cyfrową, która jest coraz częściej stosowana lub analogową przysparzającą wiele trudności w zachowaniu stabilności długoterminowych parametrów układu [4].

Wyniki pomiarów wykonanych prototypów czujnika wykazały, że pomiędzy warstwami tworzącymi cewki pomiarowe, a warstwami torów prądowych istnieje stosunkowo duża pojemność pasożytnicza. Pojemność ta powstaje na skutek geometrii czujnika. Ścieżki cewek pomiarowych tworzą dużą powierzchnię będącą jedną z okładek kondensatora pasożytniczego. Drugą okładką stanowi tor prądowy. Ponieważ cewki znajdują się na potencjale przewodu neutralnego, a tor prądowy na potencjale przewodu fazowego przez powstały kondensator przepływa prąd, który płynąc ścieżkami cewek wprowadza znaczne błędy pomiaru. Przesłuch tego rodzaju powoduje powstanie nieliniowego błędu mocy licznika energii, szczególnie przy współczynniku mocy różnym od 1. Ze względu na nieliniową charakterystykę wprowadzanego błędu jest on trudny do eliminacji zarówno drogą analogową, jak i poprzez cyfrową obróbkę sygnału.

Efekt kondensatora pasożytniczego można zminimalizować wprowadzając dodatkową warstwę miedzi pomiędzy torem prądowym, a cewkami pomiarowymi. Dodatkowa warstwa miedzi znajdująca się na potencjale przewodu neutralnego tworzy dodatkową okładkę kondensatora pasożytniczego z torem prądowym, jednocześnie ekranując elektrycznie cewki pomiarowe od toru prądowego.

Wprowadzenie dodatkowych warstw ekranujących powoduje zwiększenie ilości warstw miedzi czujnika do sześciu i zwiększa koszt produkcji. Powoduje także zwiększenie odległości pomiędzy cewką, a torem prądowym co skutkuje zmniejszeniem amplitudy sygnału użytecznego i zmniejszeniem odporności na zakłócenia. Dodanie tych warstw spowoduje także pogorszenie odprowadzania ciepła wytwarzanego przez tor prądowy, ograniczenie mocy mogącej się na nim wydzielić, a co za tym idzie ograniczenie

maksymalnej wartości prądu, jaką można mierzyć za pomocą czujnika.



Rys. 7. Przebiegi uzyskane przy pomiarze prądu przemiennego o wartości 50 A: 1 - przebieg z bocznika rezystancyjnego, 2 - przebieg z czujnika planarnego, 3 - przebieg z cewki Rogowskiego

Fig. 7. Waveforms obtained from measuring 50 A RMS alternating current: 1 - resistive shunt, 2 - planar sensor, 3 - Rogowski coil

5. Podsumowanie

Przedstawiony indukcyjny czujnik został zbudowany tak, aby jego sygnał wyjściowy był proporcjonalny tylko do pochodnej przetwarzanego prądu, natomiast sygnały pochodzące od źródeł zakłócających były kompensowane. Dzięki zaproponowanej konstrukcji uzyskano znaczną odporność na zewnętrzne pola magnetyczne. Pozwala to na pomiar prądów w wielofazowym liczniku energii, gdzie odległości pomiędzy czujnikami mierzącymi prąd w sąsiednich fazach są niewielkie.

Budowa przedstawionego czujnika oparta jest na obwodzie drukowanym, co powoduje, że jest to bardzo tania i powtarzalna konstrukcja. Ponadto pozwala ona na dołączenie elementów przetwarzania sygnału na tym samym obwodzie.

Głównym mankamentem prezentowanego czujnika jest pojemność pasożytnicza pomiędzy torem prądowym, a cewkami pomiarowymi oraz ograniczenie wartości mierzonego prądu wynikające z obciążalności ścieżek toru prądowego. Prąd maksymalny może zostać łatwo zwiększony o ile producenci obwodów będą w stanie zapewnić odpowiednią grubość miedzi toru prądowego.

6. Literatura

- [1] PKN, PN-EN 50470-3, Urządzenia do pomiaru energii elektrycznej (prądu przemiennego), Część 3: Wymagania szczegółowe, Liczniki statyczne energii czynnej (klas A, B i C), PKN.
- [2] Billewicz K.: Wykrywanie kradzieży prądu przez odbiorców indywidualnych, Przegląd Energetyczny, 03/2006.
- [3] IPC-2221, Generic standard on printed board design, Association Connecting Electronics Industries, 1998.
- [4] Bajorek J., Kolaś J., Nowak J.: Indukcyjne czujniki prądu, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2007.