

## Koncepcja rozwojowa przekładników prądowych do elektronicznych liczników energii elektrycznej

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono rozwój konstrukcji przekładników prądowych stosowanych do pomiaru prądu elektrycznego w elektronicznych licznikach energii elektrycznej. Ze względu na zastosowanie nowoczesnych materiałów na rdzenie magnetyczne przekładników, oprócz poruszanych zagadnień z dziedziny elektrotechniki i miernictwa, artykuł nawiązuje także do zagadnień z dziedziny inżynierii materiałowej. Przedstawiono wyniki badań własnych obróbki termomagnetycznej oraz opisano propozycję wdrożenia przemysłowego modułów przekładnikowych.

**Abstract.** The paper describes design development of current transformers used for measurement of electrical current in electronic watt-hour meters. Because of modern magnetic materials used in magnetic cores of current transformers, besides description of issues from the scope of electrotechnics and measurements, article describes also materials science issues. Results of own research of thermo-magnetic treatment is presented and proposal of current transformers modules industrial implementation is described. (**Concept development of current transformers of electronic energy meters.**)

**Słowa kluczowe:** przekładnik prądowy, licznik energii elektrycznej, pomiar prądu, materiały amorficzne i nanokrystaliczne.

**Keywords:** current transformer, watt-hour meter, current measurement, amorphous and nanocrystalline materials.

### Wstęp

Konieczność pomiarów energii elektrycznej datuje się na koniec wieku XIX, w którym nastąpił rozwój elektryczności. Po odkryciu zjawiska indukcji elektromagnetycznej (1831) i sformułowaniu praw elektrolizy (1834) przez Michaela Faradaya, około 50 lat później powstają pierwsze elektrownie prądu stałego, w tym elektrownia firmy Edison Electric Light Company należącej do Thomasa Alva Edisona, twórcy żarówki elektrycznej. Pod koniec wieku pojawiają się pierwsze liczniki do pomiaru energii elektrycznej prądu stałego zużywanej przez odbiorców. To właśnie Edisonowi przypisuje się konstrukcję pierwszego licznika w roku 1881, działającego w oparciu o prawa elektrolizy. Mierząc ciężar cynku wydzielonego na katodzie w procesie elektrolizy, określano wielkość zużytej energii elektrycznej. W kolejnych konstrukcjach liczników elektrolitycznych rtęciowych (ciekłych), czy wodorowych (gazowych), zastąpiono żmudny proces mierzenia ciężaru osadu katody i na tej podstawie wyznaczenia zużytej energii elektrycznej drogą pomiaru wyskalowanej w watogodzinach objętości substancji wydzielonej w procesie elektrolizy, np. w wyniku skroplenia.

Koncepcja produkcji i przesyłu energii elektrycznej prądu stałego miała zarówno zwolenników, jak i przeciwników. Znany jest spór Edisona ze swoim pracownikiem, słynnym Nikola Teslą, który po porzuceniu posady prowadził dalsze prace we własnej firmie Tesla Electric Light & Manufacturing Company i zbudował we współpracy z firmą Westinghouse pierwszą elektrownię prądu przemiennego w USA [1]. Kolejne wynalazki, takie jak turbina wodna Tesli generująca prąd przemienny oraz nieco wcześniej zbudowana przez Michała Doliwo-Dobrowolskiego prądnica trójfazowa prądu przemiennego i prezentacja w 1891 roku na Światowej Wystawie Elektrotechnicznej we Frankfurcie nad Menem kompletnego systemu trójfazowego: produkcji, przesyłu, transformacji i odbioru energii elektrycznej, przyczyniły się do powszechnego rozwoju koncepcji systemu energetycznego opartego na prądzie przemiennym [2].

Do lat 30-tych XX wieku opatentowano tysiące różnych wynalazków dotyczących urządzeń do pomiaru energii elektrycznej w oparciu o znane zjawiska przepływu prądu, takie jak: elektrochemiczne, cieplne i elektromagnetyczne, ale tylko nieliczne z nich wdrożono do produkcji. Streszczając zarys historii pomiarów energii elektrycznej nie sposób nie wspomnieć o Hermanie Aronie, który po około

dwóch latach od powstania licznika Edisona, opatentował pierwszy użytkowy licznik energii elektrycznej wykorzystujący zasadę wahadła, produkowany przez firmę Aron Elektrizitätszähler-Fabrik w Świdnicy, która po zmianie nazwy znana jest jako FAP Pafal S.A. (obecnie w grupie Apatar).

Pierwsze konstrukcje liczników prądu stałego były mało dokładne i wymagały specjalnej obsługi. Dopiero rozwój elektryczności prądu przemiennego spowodował powstanie licznych odmian elektromechanicznych liczników indukcyjnych, stosowanych po dziś dzień do pomiaru zużycia oraz kontroli przesyłu energii elektrycznej [3]. Zasada działania liczników elektromechanicznych polega na indukowaniu wirowego pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę prądową oraz napięciową w aluminiowej tarczy przenoszącej ruch obrotowy na mechanizm liczydła, którego wskazanie jest proporcjonalne do energii elektrycznej czynnej (całki mocy  $P$  po czasie) przepływającej przez licznik. Powstający w tarczy moment napędowy jest proporcjonalny do iloczynu chwilowej wartości napięcia i prądu, i jest równoważony przez moment hamujący pochodzący od magnesu hamującego, proporcjonalny z kolei do prędkości wirowania tarczy.



Rys.1. Licznik indukcyjny energii elektrycznej produkcji FAE K. Szpotański, model BT4, rok produkcji 1938 (z kolekcji autora)

Wybitnymi polskimi konstruktorami i producentami liczników energii elektrycznej byli Kazimierz Szpotański oraz Włodzimierz Krukowski [4]. Krukowski, pracując jako zastępca kierownika laboratorium w zakładach Siemens'a udoskonalił wiele konstrukcji liczników elektrolitycznych oraz opatentował wiele nowych typów liczników indukcyjnych. Szpotański jest natomiast twórcą firmy FAE K. Szpotański w Warszawie, produkującej m.in. od 1928 roku liczniki energii elektrycznej i zatrudniającej wówczas około 1500 pracowników. II wojna światowa spowodowała liczne zniszczenia firmy, która po wojnie została upaństwowiona, a w latach 90-tych XX wieku sprzedana koncernowi ABB. Liczniki produkcji Szpotańskiego są dziś wysoko cenionymi eksponatami w wielu muzeach na całym świecie, istniejących przy spółkach dystrybucji energii elektrycznej (rys.1).

Po wojnie, lata 40-te i 50-te XX wieku przyniosły unowocześnienie konstrukcji liczników indukcyjnych, które stały się dokładniejsze i dużo lepsze ze względu na wykorzystanie nowocześniejszych materiałów konstrukcyjnych (ciężkie żeliwne podstawy zastąpiono podstawami ze stopów metali nieżelaznych, a blaszane obudowy, obudowami szklanymi, później z tworzywa sztucznego oraz udoskonalono wiele innych elementów takich jak magnesy hamujące, bębny liczydła, przekładnie, łożyska, itp.).

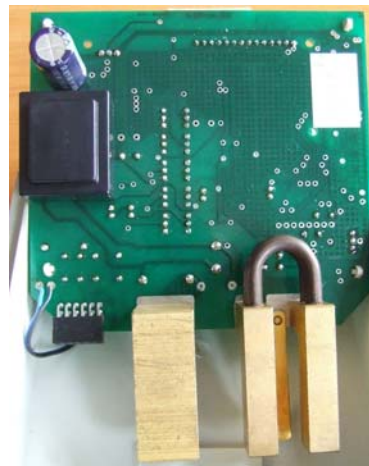
Indukcyjne liczniki energii elektrycznej stosowane są w sieciach jednofazowych oraz trójfazowych do pomiaru energii czynnej oraz biernej, jako liczniki bezpośrednie stosowane u odbiorców komunalnych oraz liczniki półpośrednie i pośrednie stosowane u odbiorców przemysłowych, a także jako liczniki kontrolne – zbiorcze do pomiarów energii elektrycznej w rozdzielniach stacji transformatorowych.

### Wymagania obowiązujące względem liczników energii elektrycznej

W dniu 22 czerwca 2011 r. Komisja Europejska przedstawiła wniosek o ustanowienie nowej dyrektywy w celu osiągnięcia poprawy efektywności energii w różnych sektorach gospodarki. Dyrektywa EED (Energy Efficiency Directive) ma się przyczynić do osiągnięcia 20% oszczędności energii pierwotnej do roku 2020. Dyrektywa ta wprowadza obowiązek wymiany liczników indukcyjnych na nowoczesne statyczne liczniki elektroniczne, które już od ponad 10 lat są obecne w sieci energetycznej, lecz nie na skalę masową. Trwająca wymiana wszystkich liczników elektromechanicznych na liczniki nowego typu tak zwanych Smart Meters uważana jest za „rewolucję licznikową”, która pozwoli na stworzenie inteligentnej sieci Smart Grid, dającej możliwość dwustronnej komunikacji pomiędzy systemem informatycznym dostawcy a licznikiem odbiorcy energii elektrycznej. System umożliwia zdalny odczyt zużycia energii elektrycznej, ale również analizowanie bieżącego zużycia przez każdego odbiorcę, przyczyniając się do lepszego zarządzania produkcją i dystrybucją energii elektrycznej.

Nowoczesne elektroniczne liczniki energii elektrycznej umożliwiają, oprócz pomiaru energii elektrycznej czynnej, także pomiar innych wielkości, takich jak energia elektryczna bierna, prąd, napięcie, moc, częstotliwość, wartość minimalna, bądź maksymalna energii elektrycznej pobieranej w określonym czasie, na przykład co 15 minut. Liczniki elektroniczne umożliwiają również pomiar energii elektrycznej przepływającej w odwrotnym kierunku od konsumenta wytwarzającego energię elektryczną ze źródeł odnawialnych, nazywanego wówczas prosumentem, do systemu energetycznego. Pomiar energii w liczniku elektronicznym odbywa się również poprzez uśrednienie za

okresu mocy chwilowej. W celu uzyskania mocy licznik mnoży wartość napięcia i wartość prądu w układzie analogowym, bądź też w układzie cyfrowym. Ze względu na poruszoną w artykule tematykę istotne znaczenie ma przetwarzanie przebiegu prądu na napięcie, które może być realizowane różnymi metodami. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie w torze prądowym licznika bocznika (rys.2), na którym napięcie jest proporcjonalne do przepływającego prądu. Rozwiązanie to jest stosowane przez wielu producentów liczników pomimo tracenia energii w boczniku w postaci ciepła i braku separacji galwanicznej.



Rys.2. Bocznik rezystancyjny w torze prądowym statycznego licznika jednofazowego (fotografia autora)

Innym sposobem pomiaru prądu jest zastosowanie w torze prądowym licznika cewki Rogowskiego (rys.3), będącej transformatorem bezrdzeniowym, odpornym na podmagnesowanie składową stałą prądu lub podmagnesowanie stałym zewnętrznym polem magnetycznym (w zależności od konstrukcji uzwojenia). Cewka Rogowskiego zapewnia separację galwaniczną, jest jednak podatna na zakłócenia zewnętrznym polem elektromagnetycznym i rzadziej stosowana w statycznych licznikach energii elektrycznej [5].

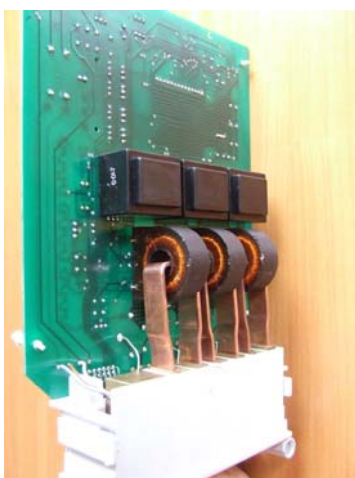
Kolejnym znanym i powszechnie stosowanym sposobem pomiaru prądu w licznikach elektronicznych jest zastosowanie przekładników prądowych, które umieszcza się wewnątrz obudowy licznika, a nie na zewnątrz, jak w przypadku liczników indukcyjnych do pomiaru półpośredniego i pośredniego. Przekładniki pomiarowe oprócz zalet, których nie mają boczniki, posiadają też wady jak wrażliwość na wpływ zewnętrznego, stałego pola magnetycznego, które można wyeliminować na etapie projektowania przekładnika i licznika energii elektrycznej [6]. Zagadnienia o bardziej zasadniczym znaczeniu związane z przekładnikami prądowymi omówione zostaną w dalszej części pracy.



Rys.3. Cewka Rogowskiego, od lewej: tor prądowy, cewka, ekran magnetyczny (fotografia autora)

### Parametry użytkowe przekładników prądowych

Przekładnik prądowy jest transformatorem obniżającym proporcjonalnie prąd pierwotny  $I_1$  o dużej wartości, na wiele mniejszy prąd wtórny  $I_2$ , indukowany w uzwojeniu wtórnym nawiniętym równomiernie, zazwyczaj na toroidalnym rdzeniu magnetycznym. Prąd wtórny o obniżonej wartości w stosunku do prądu pierwotnego, jest łatwiejszy do pomiaru i dalszej analizy. Ze względu na zamknięty obwód magnetyczny rdzenia przekładnika prądowego, jest on nieczuły na zakłócenia zmiennym zewnętrznym polem magnetycznym. Takie rozwiązanie zapewnia separację galwaniczną i stanowi korzystną alternatywę pomiędzy cewką Rogowskiego a bocznikiem. Najczęściej stosowane zakresy prądów pierwotnych przekładników licznikowych to: 6, 60, 80 i 100 A, dzięki czemu liczniki statyczne z przekładnikami umieszczonymi wewnątrz obudowy stanowiący integralną całość z licznikiem (rys.4), mogą być instalowane w punktach odbioru wiele większych mocy przyłączeniowych, podczas gdy w przypadku liczników indukcyjnych należałoby już stosować półpośredni pomiar z przekładnikami prądowymi przedlicznikowymi.



Rys.4. Przekładniki prądowe w torach prądowych statycznego licznika trójfazowego (fotografia autora za [7])

Tor prądowy przekładnika stanowi uzwojenie pierwotne o liczbie zwojów  $n_1 = 1$ , a uzwojenie wtórne nawinięte na rdzeniu toroidalnym ma przykładowo  $n_2 = 2500$  zwojów i jest zamknięte na zewnątrz przekładnika rezystorem obciążającym o odpowiednio dobranej wartości rezystancji. Mierząc spadek napięcia na rezystorze określa się wartość prądu wtórnego. Przykładowo spadek napięcia 0,3 V na rezystorze obciążającym o wartości rezystancji 7,5  $\Omega$  odpowiada prądowi wtórnemu 0,04 A, a po przemnożeniu przez przekładnię  $n_2/n_1 = 2500$ , odpowiada prądowi pierwotnemu 100 A. Zależność prądu wtórnego od prądu pierwotnego jest liniowa w całym zakresie pomiarowym przekładnika.

Zgodnie z regułą Lenza kierunek prądu wtórnego jest taki, że strumień magnetyczny w rdzeniu przekładnika wywołujący ten prąd przeciwstawia się zmianom strumienia pochodzącego od prądu pierwotnego. Dla przekładnika idealnego, strumienie magnetyczne od prądów: pierwotnego i wtórnego znoszą się, co odpowiada pełnej równowadze amperozwojów. Tym samym relacja między prądem pierwotnym a wtórnym jest wyznaczona zależnością (1).

$$(1) \quad I_2 = I_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}$$

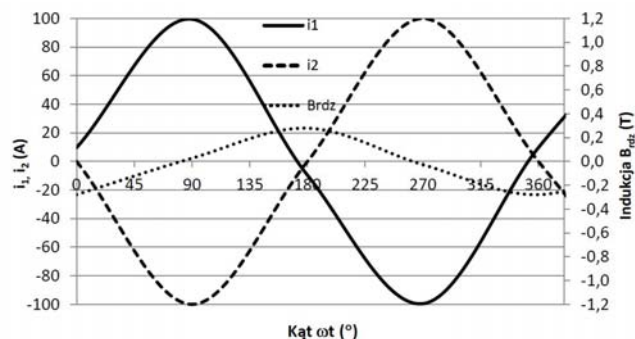
gdzie:  $I_2$  – prąd wtórny,  $I_1$  – prąd pierwotny,  $n_1$  – ilość zwojów uzwojenia pierwotnego,  $n_2$  – ilość zwojów uzwojenia wtórnego.

Dokładność pomiaru rzeczywistego przekładnika opisują dwa główne parametry. Pierwszy, błąd prądowy (przekładni)  $\varepsilon_i$  związany jest z precyzją wykonania uzwojenia wtórnego oraz tak jak i drugi – błąd kątowy  $\Delta\varphi_i$  związany jest ze stratami w uzwojeniu wtórnym i rezystorze obciążającym, tj. ze stratami związanymi z przemagnesowaniem rdzenia oraz z niskiej wartości indukcyjności  $L$ , jeśli przenikalność magnetyczna względna  $\mu_r$  rdzenia jest niewielka, rzędu kilku tysięcy. Błąd przekładni przekładnika to różnica pomiędzy wartością skuteczną prądu wtórnego  $I_2$  przemnożonego przez przekładnię  $n_2/n_1$  a wartością skuteczną prądu pierwotnego  $I_1$  w odniesieniu do prądu pierwotnego  $I_1$  wyrażona w procentach (2).

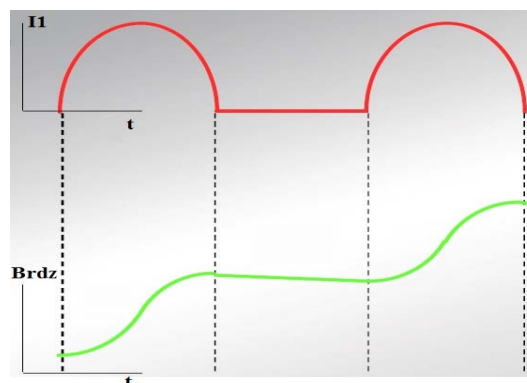
$$(2) \quad \varepsilon_i = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100(\%)$$

gdzie:  $\varepsilon_i$  – błąd prądowy (przekładni)

Błąd kątowy przekładnika to kąt fazowy między wektorami prądów pierwotnego i wtórnego, jeżeli zwroty tych wektorów są tak dobrane, że w idealnym przekładniku kąt jest równy zero. Błąd kątowy jest określany jako dodatni, jeżeli wektor prądu wtórnego wyprzedza wektor prądu pierwotnego. W związku z tym, dla ustalenia wielkości tego błędu przebieg chwilowy prądu wtórnego  $I_2$  pokazany na rys.5 powinien zostać przesunięty w fazie o 180°. Błąd kątowy przekładników prądowych o wymaganej dzisiaj klasie dokładności 0,1 nie przekracza przy prądzie znamionowym 10 minut. Nierównowaga amperozwojów powoduje, iż dla zapewnienia pokrycia strat mocy czynnej i biernej w rdzeniu i uzwojeniach przekładnika niezbędny jest przepływ prądu jałowego, którego wartość zależy od amplitudy indukcji w rdzeniu.



Rys.5. Przebiegi chwilowe prądów  $i_1$ ,  $i_2$  sprowadzone do strony pierwotnej oraz indukcji magnetycznej  $B_{rdz}$  w rdzeniu przekładnika (ilustracja własna na podstawie obliczeń)



Rys.6. Przebieg chwilowy indukcji magnetycznej  $B_{rdz}$  w rdzeniu przekładnika prądowego w obecności składowej stałej w prądzie  $I_1$  – potencjalne zagrożenie nasycaniem rdzenia [8]



Przebieg chwilowy indukcji  $B_{rdz}$  pokazano na rys. 5. Parametry obwodu elektro-magnetycznego przekładnika powinny być dobrane tak, aby nie dochodziło do nasycania rdzenia, nawet w obecności składowej stałej, gdyż taki stan prowadzi do znacznego wzrostu błędów (rys.6). Zaradzić temu można poprzez dobór odpowiedniego materiału magnetycznego rdzenia przekładnika odpornego na składową stałą i jego odpowiednią obróbkę termiczną. Zagadnienie to zostanie omówione szerzej w dalszej części pracy.

Przed konstruktorami specjalnych przekładników prądowych do współpracy z licznikami energii elektrycznej stoi wyzwanie dotyczące zarówno spełnienia wymagań uwzględniających klasę dokładności samego przekładnika i licznika energii elektrycznej (normy IEC 62053-21-23 oraz EN 50470-3), jak i opracowania konstrukcji o zminimalizowanych wymiarach możliwej do zainstalowania w niewielkich gabarytowo licznikach instalowanych na szynie TH-35 według standardu DIN [9]. Zgranie ze sobą wielu parametrów prowadzi do niewielkich rozmiarów przekładnika oraz niewielkich błędów, co jednak ograniczone jest bardziej złożonymi zależnościami. I tak przykładowo im większa indukcyjność uzwojenia wtórnego przekładnika, tym mniejsze błędy prądowy i kątowy. Indukcyjność można zwiększyć poprzez zastosowanie rdzenia z jak największą przenikalnością magnetyczną lub poprzez zwiększenie jego przekroju  $A_{Fe}$  i zmniejszenie długości drogi magnetycznej  $l_{Fe}$ . Zwiększenie przekroju rdzenia pociąga za sobą zwiększenie długości uzwojenia wtórnego, a więc i rezystancji, co wpływa z kolei na zwiększenie błędów. Indukcyjność można zwiększyć również poprzez zwiększenie ilości zwojów, gdyż indukcyjność rośnie wówczas w kwadracie. Zmniejszenie rezystancji poprzez dobór drutu nawojowego o większej średnicy skutkuje zwiększeniem przekroju uzwojenia i wielkości przekładnika. Niezwykle istotną sprawą jest również uzyskanie liniowości błędów przekładnika w całym zakresie prądu pierwotnego aż do znamionowego długotrwałego prądu cieplnego wynoszącego 120% wartości prądu pierwotnego oraz uzyskanie liniowej zależności temperaturowej błędów. Liniowość błędów umożliwia łatwą ich kompensację na etapie konstrukcji licznika energii elektrycznej.

Truizmem byłoby stwierdzenie, że uzyskanie optymalnych parametrów i klasy dokładności przekładnika zależy od wiedzy i doświadczenia konstruktora, który dobiera odpowiednio wymiary rdzenia magnetycznego, uwzględnia jego własności magnetyczne oraz projektuje uzwojenie wtórne. Uwarunkowania pełnego sukcesu leżą jednak po stronie materiału, z którego wykonano rdzeń oraz jego odpowiedniej obróbki termomagnetycznej [10, 11].

### **Rozwój materiałów magnetycznych z przeznaczeniem na rdzenie przekładników prądowych**

Przekładniki prądowe znane były i stosowane na długo przed pojawieniem się nowoczesnych statycznych – elektronicznych przekładnikowych liczników energii elektrycznej. Stosowane są w układach automatyki stacji elektroenergetycznych jako przekładniki zabezpieczeniowe oraz jako przekładniki pomiarowe przeznaczone do zasilania obwodów prądowych przyrządów pomiarowych, takich jak: amperomierze, watomierze oraz pośrednich układów indukcyjnych liczników energii elektrycznej, które nie zostały jeszcze wymienione na liczniki statyczne zgodnie z Dyrektywą EED. Zalecane zgodnie z postanowieniami obowiązującej normy PN-EN 61869-2 (dawniej: PN-EN 60044-1) wartości znamionowego prądu pierwotnego przekładników prądowych są równe od 10 A do 7500 A, a prądu wtórnego – 1 A lub 5 A [12].

Początkowo rdzenie przekładników prądowych konstruowano z wykorzystaniem taśmy stali elektrotechnicznej izotropowej (walcowanej na gorąco), a następnie anizotropowej (walcowanej na zimno) Fe-Si o 3-procentowej zawartości krzemu. Rdzenie miały wówczas kształt prostopadłościenny, jeśli były pakietowane z blach lub kształt toroidalny, jeśli zostały zwinięte z taśm elektrotechnicznych. Wraz z rozwojem materiałów magnetycznych, rdzenie przekładników stawały się coraz to lepsze pod względem własności magnetycznych, a przekładniki wykonane na takich rdzeniach były coraz dokładniejsze i mniejsze. Do takich materiałów należy stop Ni-Fe, charakteryzujący się mniejszą indukcją nasycenia od taśmy elektrotechnicznej, ale o wiele większą przenikalnością magnetyczną. Stopy Ni-Fe wykonywane są najczęściej w postaci kształtek blaszanych lub taśm, ale wykonuje się z nich również proskowe rdzenie toroidalne.

Dalsze prace rozwojowe nad uzyskaniem materiałów magnetycznie miękkich o coraz lepszych własnościach ukierunkowane zostały na taśmy szkielec metalicznych, nieposiadających struktury krystalicznej – taśmy amorficzne oraz taśmy nanokrystaliczne otrzymywane poprzez gwałtowne schłodzenie stopu w stanie ciekłym, wylewanym na obracający się z dużą prędkością bęben miedziany. Prędkość bębna i różnica temperatur rzędu  $10^6$  K/s nie pozwalają na utworzenie struktury krystalicznej w materiale. Produkcja taśm nanokrystalicznych odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie otrzymywana jest taśma w stanie amorficznym poprzez gwałtowne schłodzenie stopu, ale z udziałem dodatków takich jak Cu i Nb. W kolejnej fazie produkcji, taśma poddawana jest obróbce w polu termicznym lub termiczno-magnetycznym w celu otrzymania struktury nanokrystalicznej. Dodatki w stopie umożliwiają kontrolowany rozrost fazy krystalicznej Fe-Si w osnowie amorficznej Fe-Nb-B, skutkującej rozmiarami ziaren od 10 do 20 nm i brakiem ich orientacji w przeważającej objętości materiału [10]. Materiały amorficzne również wymagają obróbki termomagnetycznej w celu kształtowania ich własności magnetycznych, ale po obróbce zachowują strukturę amorficzną.

Sterując procesem obróbki, można materiałom amorficznym i nanokrystalicznym nadać takie własności jak: bardzo duża przenikalność magnetyczna względna  $\mu_r$ , rzędu setek tysięcy lub bardzo mała i liniowa przenikalność względna  $\mu_r$ , rzędu tysięcy, mała magnetostrykcja  $\lambda_s$ , mała wartość natężenia koercji  $H_c$ , niewielka stratność, małe straty wiroprądowe  $P_w$ , ze względu na niewielką grubość taśm ok. 25  $\mu\text{m}$ , duża rezystywność elektryczna  $\rho$  do 140  $\mu\Omega\text{cm}$  (w porównaniu do zorientowanej taśmy Si-Fe – 45  $\mu\Omega\text{cm}$ ) umożliwiająca pracę przy wysokich częstotliwościach [11].

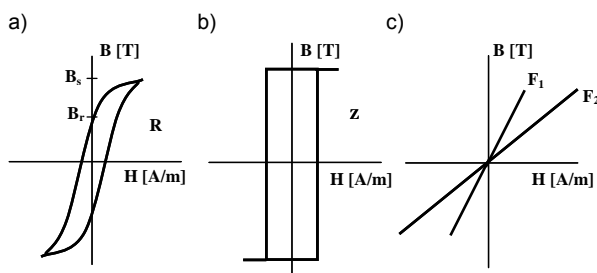
Aplikacje taśm szkielec metalicznych dotyczą większości urządzeń elektrotechnicznych, przyczyniając się do ich miniaturyzacji i większej sprawności. Ze względu na możliwość uzyskania odpowiednich własności podczas obróbki materiały te znalazły zastosowanie w produkcji rdzeni toroidalnych przekładników prądowych. Istnieją dwie grupy materiałów amorficznych wykorzystywanych do produkcji rdzeni przekładników: na bazie kobaltu oraz na bazie żelaza, które są dużo tańsze. Materiały nanokrystaliczne cechuje również niska cena ze względu na przeważającą ilość żelaza w stopie Fe-Cu-Nb-Si-B, ale spotkać się można z dodatkiem niewielkiej procentowo ilości kobaltu lub niklu, co oczywiście podwyższa cenę materiału, ale i tak stanowi alternatywę do taśm amorficznych na bazie kobaltu.

Rdzenie przekładników prądowych produkuje się również jako toroidalne, zwinięte częściowo z taśmy materiału amorficznego oraz taśmy materiału

nanokrystalicznego, co umożliwia odpowiednie ukształtowanie charakterystyki magnesowania. Dwie części rdzenia składa się w jeden albo poprzez włożenie jednego rdzenia o średnicy zewnętrznej nieco mniejszej od wewnętrznej średnicy drugiego rdzenia, albo poprzez nałożenie na siebie dwóch rdzeni o takich samych średnicach i wysokościach. Rdzenie te określa się jako „dual cores” lub „double cores”.

### Wykorzystanie inżynierii materiałowej taśm nanokrystalicznych w celu poprawy liniowości charakterystyki magnesowania

Wykonując rdzenie magnetyczne zwinięte z taśmy nanokrystalicznej, należy poddać je obróbce termicznej bez pola magnetycznego lub z polem magnetycznym o kierunku linii sił zgodnym z kierunkiem zwinięcia taśmy (równoległym do osi taśmy) – obróbka w polu podłużnym, bądź z polem magnetycznym o kierunku linii sił równoległym do osi rdzenia (poprzecznym do osi zwiniętej taśmy) – obróbka w polu poprzecznym. Wprowadzenie pola magnetycznego do obróbki termicznej prowadzi do uzyskania dwóch rodzajów anizotropii: magnetokrystalicznej oraz indukowanej odpowiedzialnej za kształt pętli histerezy magnetycznej i lepsze własności magnetyczne w określonym kierunku. Na rysunku 7 przedstawiono pętle histerezy magnetycznej rdzeni z taśmy nanokrystalicznej wykonanych w trzech różnych rodzajach obróbki.



Rys. 7. Pętle histerezy magnetycznej rdzenia nanokrystalicznego a) zaokrąglona R – po obróbce termicznej, b) prostokątna Z – po obróbce termicznej w polu magnetycznym podłużnym, c) płaska F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> – po obróbce termicznej w polu magnetycznym poprzecznym o różnych wartościach (dane literaturowe za [10])

Kształt uzyskanej pętli histerezy określa przebieg przenikalności magnetycznej w funkcji indukcji magnetycznej  $B$  oraz współczynnik będący ilorzem indukcji remanentu  $B_r$  do indukcji nasycenia  $B_s$ . Dla pętli histerezy typu R współczynnik  $B_r/B_s$  wynosi 0,4-0,7, dla pętli histerezy typu Z współczynnik  $B_r/B_s$  wynosi powyżej 0,9. Najbardziej interesującą z punktu widzenia rdzeni na przekładniki prądowe jest pętla histerezy typu F, ze względu na jej liniowość oraz liniowość przenikalności w całym zakresie prądu magnesującego aż do nasycenia; współczynnik  $B_r/B_s$  wynosi poniżej 0,2. W zależności od wartości energii anizotropii indukowanej podczas procesu obróbki rdzenia można uzyskać różny kąt nachylenia pętli histerezy magnetycznej (rys. 7c), co oznacza, że sposób doboru parametrów obróbki określa różnorodną zależność przenikalności magnetycznej w funkcji indukcji  $B$ .

Rdzenie standardowych taśm materiału nanokrystalicznego poddane obróbce w poprzecznym polu magnetycznym charakteryzują się wprawdzie stałą w pewnym zakresie indukcji  $B$  względną wartością przenikalności magnetycznej, sięgającą kilkadziesiąt tysięcy (rys. 7c, pętla F<sub>1</sub>), wykazują jednak większą wrażliwość na domagnesowanie składową stałą prądu w przypadku wystąpienia jednokierunkowego prądu przemiennego (rys. 6), np. z zasilacza posiadającego diody w uzwojeniu

pierwotnym. Takich odbiorników w sieciach odbiorców komunalnych jest obecnie coraz więcej, więc przekładniki z rdzeniami o wysokiej liniowej przenikalności nie nadają się do stosowania w licznikach statycznych instalowanych w domach mieszkańców. Nadają się natomiast do instalowania w przemysłowych statycznych licznikach energii elektrycznej, które nie są narażone na składową stałą prądu, zwłaszcza w licznikach statycznych, przyłączanych w sposób pośredni przez zewnętrzne przekładniki, tak jak w przypadku liczników indukcyjnych.

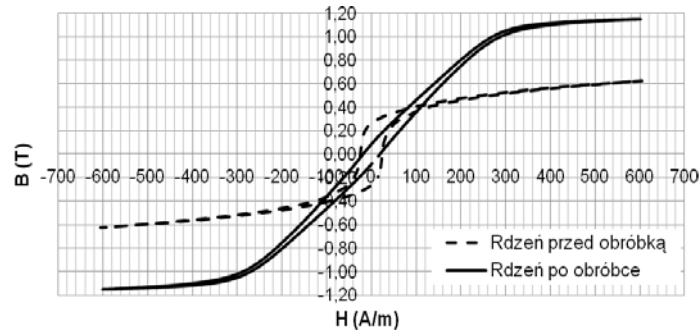
Rdzeń przekładnika prądowego odpornego na składową stałą prądu oprócz płaskiej pętli histerezy magnetycznej powinien charakteryzować się niewielkimi wartościami przenikalności rzędu do kilku tysięcy. Natężenie pola magnetycznego, w którym dochodzi do nasycenia ma wówczas wiele wyższą wartość (rys. 7c, pętla F<sub>2</sub>), aniżeli w przypadku rdzeni nieodpornych na składową stałą. Do uzyskania niskiej przenikalności magnetycznej niezbędna jest duża wartość gęstości energii anizotropii indukowanej podczas obróbki taśmy. Realizuje się to poprzez mechaniczny naciąg taśmy wzdłuż jej osi podczas obróbki termicznej lub w poprzecznym do osi taśmy polu magnetycznym, ale do uzyskania równie dużej energii anizotropii indukowanej niezbędne jest wprowadzenie pewnych dodatkowych pierwiastków do składu chemicznego taśmy Fe-Cu-Nb-Si-B, stanowiących często know-how producentów rdzeni. Produkcję pod nacięciem rdzeni odpornych na składową stałą opanowała jak na razie jedna firma na świecie [13], a taśma o odpowiednim składzie chemicznym do obróbki w polu poprzecznym jest trudno dostępna w sprzedaży. Z przyczyn ekonomicznych producenci oferują gotowe już rdzenie odporne na składową stałą oraz gotowe przekładniki.

### Wyniki badań własnych

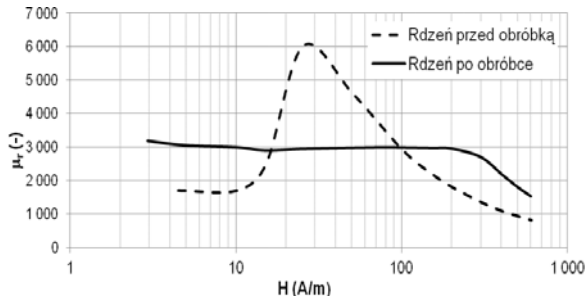
Do celów pracy naukowej pozyskano taśmę do obróbki w poprzecznym polu magnetycznym. Taśmę zwinięto w formę rdzeni toroidalnych, które poddano obróbce w skonstruowanym i wykonanym we własnym zakresie generatorze pola poprzecznego wraz z układem termicznym [14, 15]. Podczas obróbki termomagnetycznej rdzeni regulowano wiele parametrów, takich jak: prędkość wzrostu temperatury, czas przetrzymywania w temperaturze maksymalnej, prędkość spadku temperatury, wielkość pola magnetycznego oraz czas załączenia i wyłączenia pola magnetycznego. Oczekiwane własności materiału uzyskano dla piątej próbki, co jest raczej zadowalającym wynikiem, biorąc pod uwagę złożoność procesu.

Na rysunku 8 przedstawiono zmierzone charakterystyki magnetyczne rdzenia o wymiarach D30xd20xh10 mm przed obróbką i po obróbce termicznej w poprzecznym polu magnetycznym. Wysoka temperatura wygrzewania umożliwiła przejście taśmy rdzenia ze stanu amorficznego w stan nanokrystaliczny, co charakteryzuje się zwiększeniem indukcji nasycenia materiału (rys. 8a) oraz zmniejszeniem strat  $P_{Fe}$  w rdzeniu (rys. 8c), mających zasadnicze znaczenie dla błędów przekładnika prądowego. Wpływ anizotropii indukowanej wywołanej zaaplikowaniem poprzecznego pola magnetycznego względem osi taśmy rdzenia przyczynił się do tzw. spłaszczenia pętli histerezy magnetycznej (rys. 8a) i uzyskania liniowej przenikalności magnetycznej względnej o obniżonej wartości (rys. 8b), za co odpowiedzialny był również odpowiedni skład chemiczny taśmy. Uzyskanie niskiej przenikalności magnetycznej rdzenia wpłynęło korzystnie na zwiększenie jego odporności na podmagnesowanie składową stałą prądu.

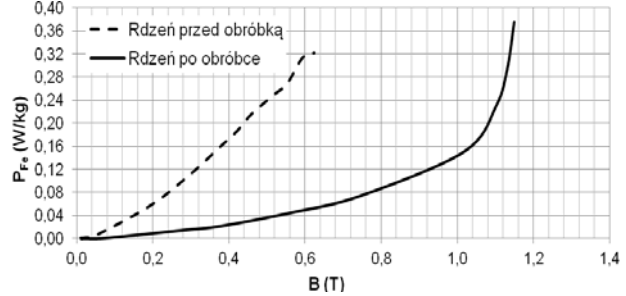
a)



b)

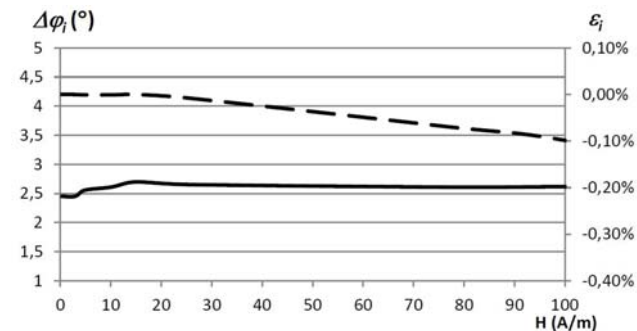


c)



Rys.8. Charakterystyki magnetyczne rdzenia przed obróbką i po obróbce termicznej w poprzecznym polu magnetycznym (wyniki własne): a) pętle histerezy magnetycznej, b) przenikalności magnetyczne względne, c) straty w rdzeniu

Po przeprowadzonych próbach obróbki i uzyskaniu pożądanych charakterystyk magnetycznych, zaprojektowano, wykonano i poddano badaniom odporny na składową stałą prądu przekładnik o znamionowym prądzie pierwotnym 60 A. Na rysunku 9 przedstawiono błędy: kątowy  $\Delta\phi_i$  i prądowy  $\varepsilon_i$  w funkcji natężenia pola magnetycznego wyznaczonego na podstawie prądu magnesującego przekładnika sprowadzonego do jego strony pierwotnej [16]. Błąd kątowy wynosi około 2,6 stopnia, co może wydawać się dużym błędem w porównaniu do wspomnianych wcześniej najdokładniejszych przekładników. Błąd kątowy rzędu kilku stopni w przekładnikach odpornych na składową stałą spowodowany jest niską przenikalnością rdzenia i należy go skompensować analogowo filtrem dolnoprzepustowym RC na wejściu przetwornika AC licznika lub cyfrowo przez odpowiednią korekcję w mikroprocesorze, co jest wykonywane powszechnie przez producentów liczników energii elektrycznej. Tak więc, cecha ta nie stanowi żadnej przeszkody w upowszechnieniu rozwiązania [15].

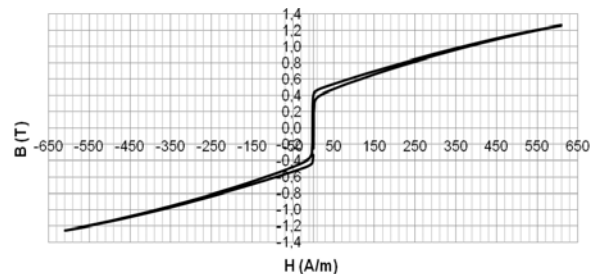


Rys.9. Błędy transmisji przekładnika 60 A (wyniki własne): kątowy  $\Delta\phi_i$  (linia ciągła), prądowy  $\varepsilon_i$  (linia przerywana)

W rdzeniu wykonanego przekładnika w warunkach pracy znamionowej bez podmagnesowania składową stałą

prądu, indukcja magnetyczna  $B_{dc}$  przyjmuje wartość ok. 0,13 T. Rdzeń daleki jest od nasycenia i gdyby nie wymóg odporności na składową stałą, przy wymiarach D30xd20xh10 mm i przenikalności względnej  $\mu_r = 3000$  nadawałby się do pomiaru prądu o wartości 300 A.

Odporność na składową stałą prądu uzyskuje się również dla rdzeni „dual core” złożonych z materiału amorficznego i nanokrystalicznego. W tym przypadku obydwie części rdzenia wymagają osobnej obróbki termomagnetycznej. Ze względu na odmienne własności magnetyczne obydwu części rdzenia, po złożeniu w całość otrzymuje się wypadkowe charakterystyki magnetyczne. Na rysunku 10 przedstawiono pętlę histerezy magnetycznej przykładowego rdzenia „dual core”. Wykazuje ona w początkowym zakresie, do ok. 0,4 T, właściwości materiału o dużej stromości charakterystyki magnesowania, aby następnie załamać przebieg w stronę mniejszego nachylenia krzywej magnesowania.



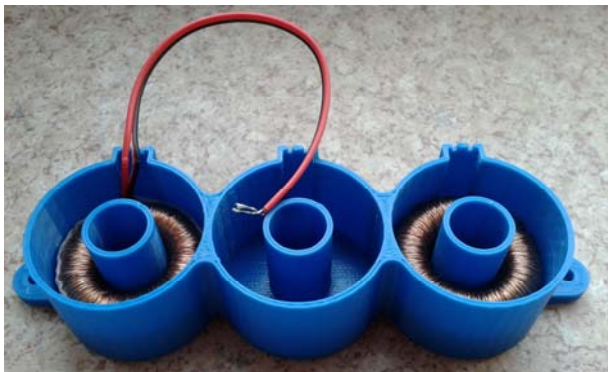
Rys.10. Pętla histerezy magnetycznej rdzenia „dual core” (wyniki własne)

Przekładniki odporne na składową stałą z rdzeniami „dual core” są często wykorzystywane przez producentów liczników energii elektrycznej ze względu na ich niską cenę oferowaną przez producentów. Stanowią one alternatywę dla droższych przekładników z rdzeniami amorficznymi na bazie kobaltu lub rdzeniami nanokrystalicznym na bazie

żelaza. Nie wszyscy jednak producenci przekładników o rdzeniach „dual core” podają szczegóły ich konstrukcji i zastosowanych materiałów, a wiedzieć należy, że w przypadku pojawienia się w sieci prądu jednokierunkowego przy współczynniku mocy różnym od jedności, przekładniki na rdzeniach „dual core” charakteryzują się dodatkowymi błędami w zakresie  $-7,5 - +18\%$ . Z tego względu nie są rekomendowane przez autora do zastosowania w licznikach energii elektrycznej mimo spełnienia wymagań przytoczonych wcześniej norm, które zalecają badanie odporności na składową stałą prądu i wyższe harmoniczne przy współczynniku mocy równym 1, co nie zawsze odpowiada rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym [17].

### Proponowane rozwiązania konstrukcyjne przekładników prądowych do statycznych liczników energii elektrycznej

Z przedstawionego powyżej omówienia zagadnienia przekładników prądowych szczególnego przeznaczenia wynika możliwość wykorzystania do ich budowy różnorodnych, nowoczesnych materiałów magnetycznych miękkich. Podobnie jest w przypadku zewnętrznej konstrukcji przekładnika, jego obudowy oraz wyprowadzeń prądowych. Rdzeń toroidalny z nawiniętym na nim uzwojeniem wtórnym przekładnika zalewany jest żywicą w obudowie z tworzywa sztucznego wykonywanej zazwyczaj w technologii wtryskowej. Występują również rozwiązania, w których obudowa wykonywana jest na uzwojonym rdzeniu w jednym procesie zalewowym. Obudowa przekładnika zapewnia ochronę rdzenia przed narażeniami mechanicznymi oraz odpowiednią izolację elektryczną pomiędzy torem prądowym uzwojenia pierwotnego a uzwojeniem wtórnym.



Rys.11. Wyprowadzenie uzwojenia wtórnego przewodem z obudowy modułu trójfazowego przekładnika przed zalaniem żywicą (rozwiązanie własne)



Rys.12. Wyprowadzenie uzwojenia wtórnego z obudów przekładników prądowych za pomocą pinów (opracowanie własne)

Większość przekładników prądowych ma konstrukcję przelotową. Obudowa ma otwór przeznaczony na umieszczenie w nim przewodu prądowego uzwojenia pierwotnego w postaci przewodu lub pręta miedzianego. Rozwiązanie z położonym przez otwór prętem jest wykor-

zystywane w licznikach energii elektrycznej, gdzie odpowiednio dogięty pręt przechodzący przez przekładnik prądowy, łączy wewnątrz obudowy licznika odpowiednie terminale listwy zaciskowej. Wyprowadzenie uzwojenia wtórnego z przekładnika realizowane jest w dwojaki sposób, albo za pomocą linki miedzianej w izolacji, albo za pomocą pinów umieszczonych trwale w obudowie (rys.11, 12).

W celu ułatwienia montażu przekładników w listwach zaciskowych liczników, proponuje się rozwiązanie obejmujące swą konstrukcją również miedziany tor prądowy uzwojenia pierwotnego, którego rozstaw jest dopasowany do rozstawu terminali listwy zaciskowej licznika (rys.13). W zależności od sposobu montażu przekładnika w listwie zaciskowej licznika, końcówki toru prądowego mogą pozostać w formie pręta, bądź też zostać spłaszczone, by wykonać w nich otwór na śrubę montażową (jak na rysunku 3 w przypadku cewki Rogowskiego). Ułatwienie montażu dotyczy szczególnie trójfazowych liczników energii elektrycznej, gdzie dotychczas należało zamontować trzy oddzielne przekładniki, podczas gdy można zainstalować jeden trójfazowy moduł przekładnika prądowego (rys.11, 13).



Rys.13. Moduł trójfazowy przekładnika prądowego z umieszczonymi trwale torami wysokoprądowymi (opracowanie własne) [15]



Rys.14. Ekran magnetyczny jednofazowego modułu przekładnika (opracowanie własne) [15]

Jako alternatywne, wobec liczników z bocznikami jako przetwornikami prądu odpornymi na wpływ zewnętrznego pola magnetycznego, rozwiązanie proponuje się wykorzystanie modułów przekładnikowych z ekranem magnetycznym wykonanym z materiału ferromagnetycznego o wysokiej przenikalności magnetycznej (rys.14). Przy zachowaniu wystarczającego odstępu od obudowy przekładnika, wynoszącego ok. 10 mm, ekran magnetyczny skutecznie eliminuje wpływ zewnętrznego pola magnetycznego nawet od najsilniejszych, dostępnych na rynku magnesów neodymowych [18]. Wymagana minimalna odległość między zewnętrznymi elementami

obudowy licznika a ustrojem pomiarowym może być w większości rodzajów liczników zapewniona. Zapobiega to próbom nielegalnego zaniżania wskazania licznika energii elektrycznej za pomocą magnesu neodymowego [19].

Przedstawiony na rysunku 14 przekładnik wymaga odłania z żywicy kolejnej obudowy chroniącej ferromagnetyczny ekran magnetyczny podatny na korozję przed wpływem czynników klimatycznych oraz zapewniającej odpowiednią izolację elektryczną.

Łączenie kilku elementów pomiarowych w jeden moduł nowoczesnych liczników energii elektrycznej staje się pożądanym i coraz powszechniejszym rozwiązaniem ze strony ich producentów. Z tych względów kontynuowane są prace rozwojowe nad modułami pomiarowo-rozłącznikowymi.

### Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w pracy informacje dotyczące materiałów wykorzystywanych do produkcji rdzeni magnetycznych przekładników prądowych do pomiaru prądu w elektronicznych licznikach energii elektrycznej wskazują jednoznacznie na potrzebę rozwoju procesu obróbki termomagnetycznej taśm szkieł metalicznych, głównie taśm nanokrystalicznych na bazie żelaza. Proces obróbki uwarunkowany wieloma parametrami regulacji oraz trudność dostępu materiału o odpowiednim składzie chemicznym utrudniają znacznie możliwość rozwoju produkcji przekładników licznikowych na skalę masową w kraju. Przedstawione w artykule wyniki badań własnych dają podstawę do kontynuacji poszukiwań zarówno odpowiedniego składu chemicznego materiału, jak i odpowiednich parametrów obróbki termicznej. Celem tych działań jest uzyskanie liniowości charakterystyki magnesowania rdzeni w szerszym zakresie indukcji magnetycznej zapewniającej wymaganą stałość przenikalności magnetycznej, zmniejszenie wymiarów przekładnika, jego większą odporność na składową stałą prądu oraz stałość błędów w funkcji prądu pierwotnego.

Połączenie wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej oraz elektrotechniki daje możliwość wykonywania przekładników prądowych zgodnie z wymaganiami konstruktorów liczników energii elektrycznej oraz obowiązującymi normami. Biorąc pod uwagę takie zagadnienia jak zabezpieczenie przekładnika przed wpływem silnego zewnętrznego stałego pola magnetycznego oraz specjalna konstrukcja polegająca na połączeniu toru prądowego i dopasowaniu rozstawu oraz sposobu montażu do listwy zaciskowej licznika, można uznać przyjęty kierunek rozwoju jednofazowych i trójfazowych modułów pomiarowych przekładników prądowych za uzasadniony.

### LITERATURA

- [1] Słowiński P., Słowiński K., Władca piorunów. Nikola Tesla i jego genialne wynalazki, Wydawnictwa Videograf SA, Chorzów 2013
- [2] Ciok Z., Królikowski L., Nowakowski R., Szymczak P., Michał Doliwo-Dobrowolski – współtwórca cywilizacji technicznej XX wieku, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2009), nr.1, 38-49
- [3] Moszczyński P., Ewolucja kontrolnych liczników energii elektrycznej, *Elektro Info*, (2008), nr.11, 38-41
- [4] Prace Włodzimierza Krukowskiego, PAN, Warszawa 1956
- [5] Pałęga M., Pluta W., Soiński M., Nowoczesne zabezpieczenia liczników przed wpływem zewnętrznych pól magnetycznych, *Seminarium PEE '2005*, Zegrze k/Warszawy
- [6] Billewicz K., Kradzież energii za pomocą magnesu neodymowego i jej wykrywanie, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2006), nr.6, 82-85
- [7] Soiński M., Negatywne oddziaływanie magnesów na liczniki energii elektrycznej (część 2), *Elektro Info*, (2008), nr.9, 2-5
- [8] Hilzinger R., Rodewald W., *Magnetic materials, Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau, Publicis Publishing, Erlangen*, 2013
- [9] Elektroniczny 3-fazowy licznik energii elektrycznej czynnej sEA do zabudowy na szynie TH-35, karta katalogowa, ZEUP *Pozyton Sp. z o.o.*
- [10] Soiński M., Materiały magnetyczne w technice, *COSiW SEP*
- [11] Tumański S., Modern magnetic materials – the review, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010), nr.4, 1-15
- [12] PN-EN 61869-2:2013-06, Przekładniki – Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych
- [13] Zamborszky F., History and industrialization of tensile stress annealing of FINEMET-ribbons, Round-table discussion on induced anisotropies, SMM 21 Conference, Budapeszt 1-4 wrzesień 2013
- [14] Kozłowski A., Large DC electromagnet for semi-industrial thermomagnetic processing of nanocrystalline ribbon, *IEEE Transactions on Magnetics*, (2014), nr.4
- [15] Projekt pt. „Badania przemysłowe modułów pomiarowych rzeczywistego zużycia energii elektrycznej”, UDA-POIG.01.04.00-24-006/11-00
- [16] Soiński M., Pluta W., Żurek S., Kozłowski A., Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (2014), Vol.44, 279-284
- [17] Current transformers and power line transformers for smart metering, *Vacuumschmelze*, PB-CT Edition 2012
- [18] Leonowicz M., Materiały magnetyczne twarde, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2002), nr.9, 261-268
- [19] Kierunki ochrony liczników energii elektrycznej od wpływu zewnętrznych pól magnetycznych, *Seminarium IEEE Magnetics Society Polish Chapter*, Częstochowa 19.05.2005

---

**Autor:** mgr inż. Adam Kozłowski, Politechnika Częstochowska, Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, E-mail: akozlowski.izte.pcz@gmail.com