

## Sprawdzanie mierników cęgowych z zastosowaniem kalibratorów prądu

### Wstęp

Do pomiaru dużych wartości prądu stałego i/lub przemiennego, rzędu kilku tysięcy amperów niskich częstotliwości (częstotliwości sieci energetycznej), bez konieczności przerywania kontrolowanego obwodu prądowego, stosowane są cęgi prądowe. Cęgi prądowe przetwarzają pierwotny prąd pomiarowy o dużej wartości na wtórny prąd o proporcjonalnie mniejszej wartości lub na napięcie wtórne proporcjonalne do prądu pierwotnego – pełnią funkcję przetwornika prąd-prąd lub prąd-napięcie z oddzieleniem galwanicznym wejścia i wyjścia.

Głównym przeznaczeniem cęgów z wyjściem prądowym jest rozszerzenie w górę zakresu pomiaru prądu – przykładowo, bezpośredni zakres pomiaru prądu 0,005...6 A analizatora parametrów sieci typu Calport-100 [1], po zastosowaniu cęgów Miniclamp-5 [2] może być rozszerzony do 0,5...100 A, a po zastosowaniu cęgów C122 [2] może być rozszerzony do 5...1000 A. Zaletą cęgów z wyjściem prądowym jest duża odporność obwodu pomiarowego na działanie zakłóceń i pomijalny wpływ rezystancji przewodów na błąd pomiaru.

Cęgi z wyjściem napięciowym umożliwiają pomiar prądu z zastosowaniem woltomierzy lub innych przyrządów z wejściem napięciowym – przykładowo oferowane są cęgi C160 [2], które umożliwiają pomiar prądów w zakresie 0,1...30/300/2000 A z zastosowaniem oscyloskopu. Funkcje cęgów z wyjściem napięciowym pełnią elastyczne przekładniki pętlowe – przykładowo seria przekładników typu AmpFlex umożliwia pomiar prądu w zakresach 0,5...20/200/2000/10000 A. Zaletą przekładników pętlowych jest możliwość pomiaru prądu w trudno dostępnych miejscach i na szynach o dużych przekrojach – długość pętli mieści się w zakresie 50...120 cm – z tego powodu stosowane są chętnie w energetyce.

Cęgi prądowe w połączeniu z miernikami analogowymi lub cyfrowymi tworzą cęgowe amperomierze z zakresami nawet do 2000 A lub cęgowe mierniki mocy z zakresami do 1000 A.

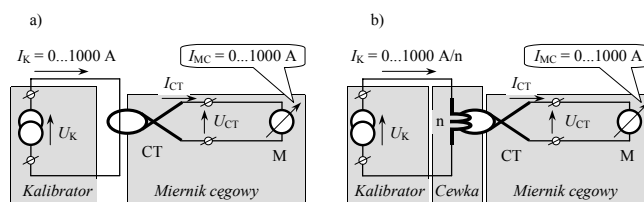
Rozwój produkcji mierników cęgowych i cęgów pomiarowych stworzył dla laboratoriów pomiarowych nowe problemy metrologiczne. Dla tych laboratoriów, które już posiadają kalibratory prądu, głównym problemem jest dobór konstrukcji cewki obwodu pomocniczego do możliwości obciążeniowych posiadanego kalibratora. Dla tych laboratoriów, które planują zakup kalibratora prądu, głównym problemem jest dobór mocy kalibratora do odpowiedniej liczby amperozwojów obwodu pomocniczego stosowanego w procesie wzorcowania.

### Idea sprawdzania mierników cęgowych

Na rys. 1 przedstawione są dwa równoważne układy do sprawdzania mierników cęgowych:

- układ z kalibratorem,
- układ z kalibratorem i cewką.

W obu układach badany miernik cęgowy złożony jest z cęgów prądowych CT i miernika M. Wskazania badanego miernika cęgowego  $I_{MC}$  w zakresie 0...1000 A odpowiadają nastawom prądu  $I_K$  kalibratora prądu, który w przedstawionych układach pełni funkcję wzorca.



Rys. 1. Układy do sprawdzania mierników cęgowych:

a) układ z kalibratorem, b) układ z kalibratorem i cewką

W układzie przedstawionym na rys. 1a) kalibrator nie jest wspomagany cewką, a wymagany zakres nastaw prądu kalibratora  $I_K$  (górna granica nastaw) jest równy zakresowi wskazań badanego miernika. Uniwersalne kalibratory prądów odtwarzają prądy do 10 A lub 20 A [3,4,5] oraz wyjątkowo do 100 A [6]. Mały zakres prądów wyjściowych tych kalibratorów ogranicza możliwości stosowania tego układu pomiarowego do badania mierników cęgowych o małych zakresach pomiarowych, np. do 10 A lub 20 A ew. 100 A.

W układzie podanym na rys. 1b), do zacisków kalibratora prądu jest dołączona cewka o  $n$  liczbie zwojów, objęta cęgami badanego miernika. Wymagany zakres nastaw kalibratora jest określony wzorem:

$$(1) \quad I_K = \frac{I_{MC}}{n}$$

gdzie:  $I_{MC}$  – zakres wskazań (górna granica pomiarów) badanego miernika,  
 $n$  – liczba zwojów cewki.

Ze wzoru (1) wynika, że przy stosowaniu cewki o liczbie zwojów  $n = 50$  i kalibratora o zakresie nastaw  $I_K = 0...20$  A możliwe jest sprawdzanie mierników cęgowych o zakresach pomiarowych  $I_{MC} = 0...1000$  A.

W układzie na rys. 1b) możliwe jest również badanie cęgów prądowych CT. W przypadku badania cęgów z wyjściem prądowym, prąd wyjściowy cęgi  $I_{CT}$  powinien być mierzony przy użyciu wzorcowego amperomierza M, natomiast w przypadku badania cęgów z wyjściem napięciowym, napięcie wyjściowe cęgów  $U_{CT}$  powinno być mierzone wzorcowym woltomierzem M.

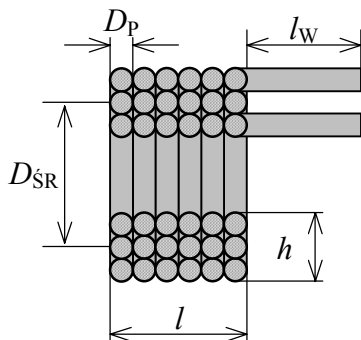
### Parametry cewek

Podstawowe parametry cewek, przeznaczone do sprawdzania cęgów prądowych i mierników cęgowych, są następujące:

- liczba zwojów  $n$  wynikająca z zależności (1),
- wymiary gabarytowe cewki, w szczególności średnica  $D_{SR}$ , długość  $l$  i wysokość  $h$  (rys. 2), które powinny spełniać następujące wymaganie swobodnego zamykania cęgów:

$$(2) \quad \begin{aligned} h &< h_{RC} \\ \sqrt{h^2 + l^2} &< D_{WC} \\ D_{SR} - h &> g_C \end{aligned}$$

gdzie  $h_{RC}$  – szerokość rozwarcia cęgów,  $D_{WC}$  – średnica wewnętrzna cęgów i  $g_C$  – grubość cęgów.



Rys. 2. Oznaczenie wymiarów gabarytowych cewki:

$l_W$  – długość wyprowadzeń cewki,  
 $D_P$  – średnica przewodu cewki.

Spełnienie dwóch pierwszych nierówności wymagania (2) można uzyskać przez zmniejszenie wysokości  $h$  i długości  $l$  cewki, co przy zadanej liczbie zwojów cewki  $n$  jest realizowane przez stosowanie przewodów o mniejszych średnicach  $D_P$ . Spełnienie trzeciej nierówności wymagania (2) jest realizowane przez zwiększanie średnicy cewki  $D_{SR}$ .

Zmniejszanie średnicy przewodu  $D_P$  oraz zwiększanie średnicy cewki  $D_{SR}$  w celu spełnienia wymagania (2) prowadzi do zwiększania impedancji cewki danej wzorem:

$$(3) \quad Z_T = \sqrt{R_T^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_T)^2}$$

gdzie:  $R_T$  – rezystancja cewki,  $f$  – częstotliwość prądu,  $L_T$  – indukcyjność cewki. Rezystancja i indukcyjność cewki mogą być wyznaczone z następujących wzorów [7]:

$$(4) \quad R_T = \frac{\rho \cdot \left[ 1 + \frac{\lambda \cdot (T - 20)}{100} \right] \cdot (n \cdot \pi \cdot D_{SR} + 2 \cdot l_W)}{0,25 \cdot \pi \cdot D_P^2}$$

$$L_T = \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot D_{SR}^2 \cdot n^2}{3 \cdot D_{SR} + 9 \cdot l + 10 \cdot h}$$

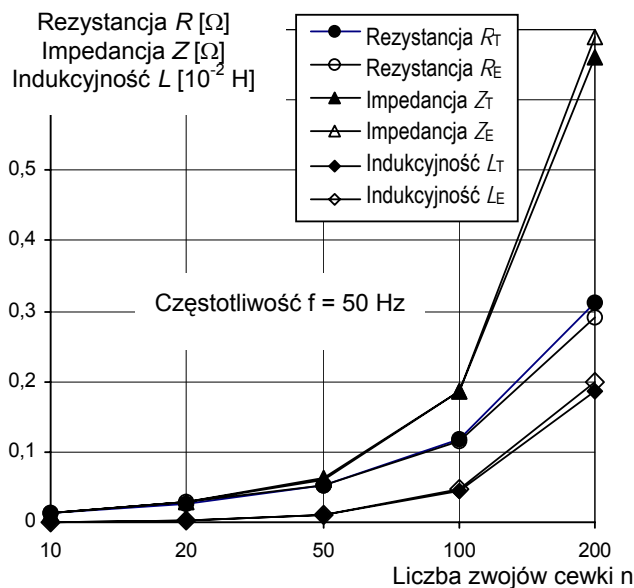
gdzie:  $\rho$  – rezystancja właściwa miedzi równa  $0,0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,  
 $\lambda$  – temperaturowy współczynnik rezystancji miedzi równy  $0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ ,  
 $T$  – temperatura cewki w  $^{\circ}\text{C}$ ,  
 $D_{SR}$ ,  $l_W$ ,  $l$ ,  $h$  – wymiary cewki [m],  
 $D_P$  – średnica przewodu cewki w  $[\text{mm}^2]$ ,  
 $L_T$  – indukcyjność cewki w [H].

Zwiększanie liczby zwojów a więc i impedancji cewki  $Z_T$  jest niekorzystne, ponieważ powoduje zwiększanie napięcia  $U_K$  na zaciskach wyjściowych kalibratora prądu (rys. 1) i zwiększanie zapotrzebowania na moc wyjściową kalibratora. Przy zbyt dużych impedancjach obciążenia kalibrator nie jest w stanie odtwarzać nastawioną wartość prądu.

W tabelicy 1 zestawiono parametry pięciu cewek o różnych liczbach zwojów  $n$ . Cewki nr 1 i 2 o liczbie zwojów odpowiednio 10 i 20 mają małą wysokość i długość, co umożliwia sprawdzanie cęgów o małych średnicach, np. serii cęg Miniclamp lub E [2], które zazwyczaj mają zakresy prądowe do około 150 A. Cewki nr 3, 4 i 5 o liczbie zwojów odpowiednio 50, 100 i 200 umożliwiają sprawdzanie cęgów o prądach do 1000 A, np. serii cęgów C [2] lub amperomierzy cęgowych [8], przy stosowaniu kalibratora o nastawach odpowiednio: 20 A, 10 A i 5 A.

Tabela 1. Parametry cewek przystosowanych do sprawdzania cęgów i mierników cęgowych

Lp	Nr cewki Parametr	1	2	3	4	5
1	Liczba zwojów $n$	10	20	50	100	200
2	Średnica przewodu $D_P$ [mm]	1,8	1,8	2,0	2,0	1,8
3	Wysokość cewki $h$ [mm]	6	10	7	12	18
4	Długość cewki $l$ [mm]	7	10	35	37	37
5	Średnica cewki $D_{SR}$ [mm]	48	53	51	60	64
6	Długość wyprowadzeń $l_W$ [mm]	90	80	200	270	180
7	Rezystancja cewki $R_T$ (4) [ $\Omega$ ]	0,0131	0,0272	0,0512	0,1188	0,311
8	Rezystancja cewki $R_E$ [ $\Omega$ ]	0,0128	0,0276	0,0521	0,1147	0,292
9	Indukcyjność cewki $L_T$ (4) [ $\mu\text{H}$ ]	6,90	25,8	96,7	455	1859
10	Indukcyjność cewki $L_E$ [ $\mu\text{H}$ ]	7,23	26,2	105,3	472	1991
11	Impedancja cewki $Z_T$ (3) dla $f = 50 \text{ Hz}$ [ $\Omega$ ]	0,0133	0,0284	0,0595	0,1858	0,661
12	Impedancja cewki $Z_E$ dla $f = 50 \text{ Hz}$ [ $\Omega$ ]	0,0130	0,0288	0,0617	0,1873	0,690



Rys. 3. Wykresy parametrów elektrycznych cewek

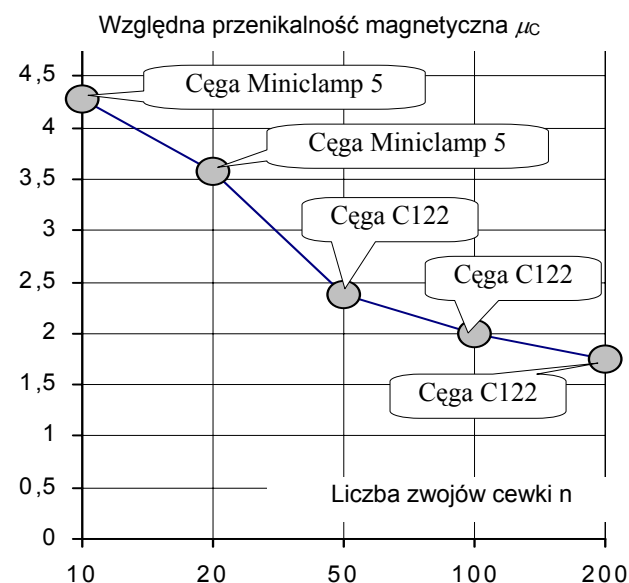
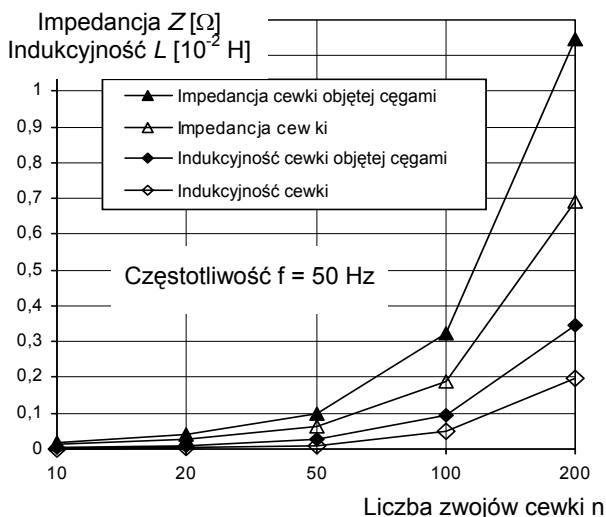
W dolnych wierszach tabelicy 1 i na rys. 3 przedstawiono parametry elektryczne cewek: obliczone ze wzorów (4) i (5) rezystancję  $R_T$ , indukcyjność  $L_T$  i impedancję  $Z_T$  oraz zmierzone wartości rezystancji  $R_E$ , indukcyjności  $L_E$  i impedancji  $Z_E$  modeli fizycznych cewek. Zbieżność wyników obliczeń i wyników pomiarów modeli fizycznych potwierdza przydatność wzorów (4) i (5) do obliczania parametrów cewek. Z wykresu widać, że dla cewek do 50-ciu zwojów, dla częstotliwości sieciowych, impedancja cewki jest w przybliżeniu równa jej rezystancji.

### Wpływ załączenia cęgów na parametry cewki

Po objęciu cewki cęgami następuje zwiększenie indukcyjności i impedancji cewki, co przedstawiono na rys. 4. Miarą wzrostu indukcyjności cewki jest względna przenikalność magnetyczna  $\mu_C$  dana wzorem:

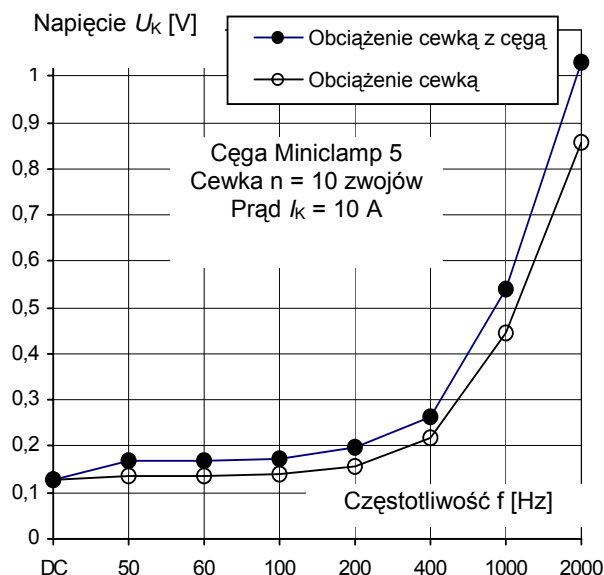
$$(5) \quad \mu_C = L_{CP} / L$$

gdzie:  $L_{CP}$  - indukcyjność cewki objętej cęgami,  $L$  - indukcyjność samej cewki. Wykres względnej przenikalności magnetycznej dla różnych cewek przedstawiono na rys. 4, z którego widać, że objęcie cewki cęgami może spowodować ponad dwukrotne zwiększenie indukcyjnej składowej impedancji.



Rys. 4. Wykresy ilustrujące zwiększenie indukcyjności i impedancji cewki po załączeniu cęgi

Na rys. 5 przedstawiono wykres wymaganego spadku napięcia  $U_K$  na wyjściu kalibratora prądu w funkcji częstotliwości dla dwóch przypadków obciążeń: cewki objętej cęgami i cewki nie objętej cęgami. Wykres pokazuje, że dla cewki z najmniejszą liczbą zwojów, już dla częstotliwości powyżej 400 Hz następuje gwałtowny wzrost wymaganej wydajności napięciowej kalibratora prądu, spowodowany wzrostem impedancji cewki.



Rys. 5. Wykres napięcia kalibratora w funkcji częstotliwości

### Obciążalność kalibratorów prądu

Właściwości kalibratora prądu powinny możliwie zbliżyć się do idealnego źródła prądowego o nieskończonej mocy. Stopień odstępstwa rzeczywistego kalibratora prądu od właściwości idealnego źródła, w zakresie obciążalności, opisywany jest najczęściej terminem obciążalności wyjścia  $U_0$  definiowanym jako największa wartość napięcia na wyjściu kalibratora prądu, przy którym gwarantowane są normowane parametry dokładności kalibratora. Termin obciążalność wyjścia jest chętnie stosowany przez producentów kalibratorów, ponieważ jest wspólny zarówno dla kalibratorów prądu, jak i kalibratorów napięcia – w takim przypadku definiowany jest jako największa wartość prądu na wyjściu kalibratora napięcia. Czasami ograniczona wartość obciążalności wyjścia kalibratora prądu jest opisywana takimi parametrami jak moc wyjściowa  $P_0$  lub największa impedancja  $Z_0$  (lub rezystancja  $R_0$ ) obciążenia, między którymi występuje następujący związek:

$$(6) \quad U_0 = \frac{P_0}{I_K} = Z_0 \cdot I_K$$

gdzie:  $I_K$  - nastawiona wartość prądu wyjściowego kalibratora.

Ograniczona obciążalność wyjścia kalibratora prądu jest istotnym czynnikiem, który ogranicza możliwości stosowania kalibratorów do sprawdzania mierników cęgowych, ponieważ kalibrator powinien spełniać następujące wymaganie wystarczającej obciążalności:

$$(7) \quad U_0 \geq U_K = (Z + Z_P) \cdot I_K$$

gdzie:  $U_K$  - spadek napięcia na wyjściu kalibratora (rys. 1),

$Z$  - impedancja cewki objętej cęgami,

$Z_P$  - impedancja przewodów (rys. 1) łączących kalibrator z cewką.

Na rys. 6 przedstawiono wykresy obciążalności  $U_0$  różnych typów kalibratorów w funkcji prądu wyjściowego kalibratora  $I_K$ . W polu wykresu zaznaczono wartości wymaganej napięciowej kalibratora  $U_K$  dla przypadków zasilania cewki o 200-tu zwojach prądem 5 A (dc – stałym i ac – przemiennym), cewki o 100-tu zwojach prądem 10 A

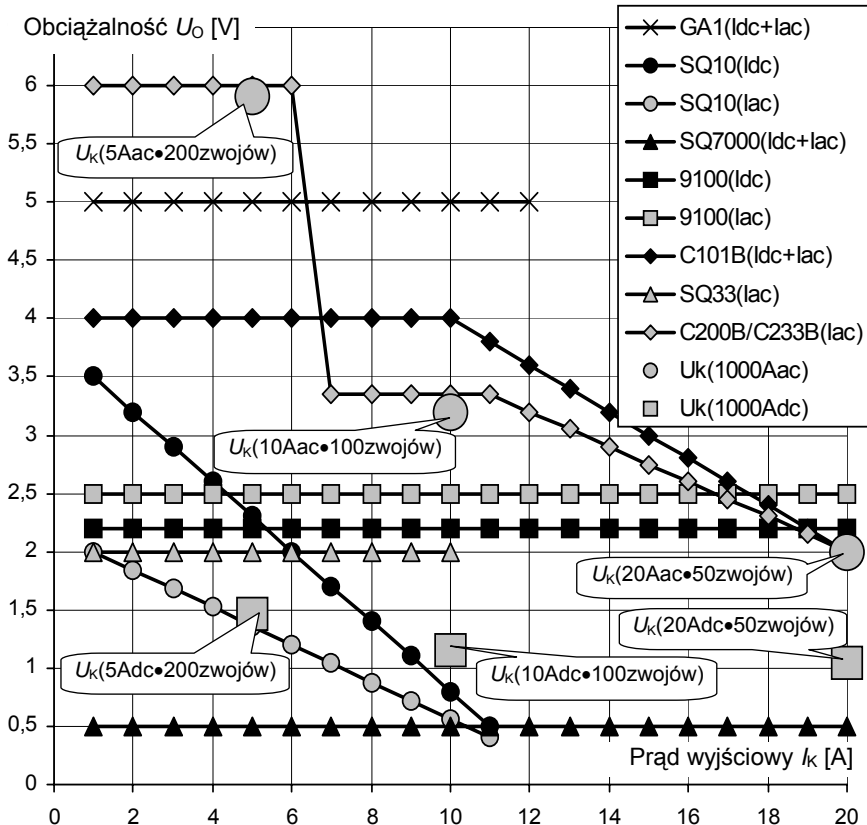
oraz cewki o 50-ciu zwojach prądem 20 A. Zgodnie z wymaganiem (7), zadaniu sprawdzania mierników cęgowych do 1000 A może sprostać tylko ten kalibrator, którego charakterystyka obciążeniowa przebiega powyżej zaznaczonych napięć  $U_k$ .

Z wykresu przedstawionego na rys. 6 widać także, że pierwszy krajowy kalibrator uniwersalny typu GA1 [9] był w stanie zasilić cewkę o 100-tu zwojach prądem stałym i przeniennym o wartości 10 A, ponieważ jego obciążalność wynosiła 5 V przy prądzie 10 A, a spadek napięcia na cewce o 100-tu zwojach objętej cęgami typu C122 jest równy 3,25 V. Obciążalność następnego krajowego kalibratora uniwersalnego typu SQ10 [3] była już zbyt mała, aby stosować go do sprawdzania mierników cęgowych prądu przemiennego do 1000 A. Kolejny krajowy kalibrator uniwersalny typu SQ7000 [4] miał już tak małą moc wyjściową dla zakresów prądowych, że nie pozwalał na sprawdzanie nawet mierników cęgowych prądu stałego. Podobne ograniczenia występowały przy stosowaniu zagranicznych kalibratorów uniwersalnych. Dopiero kalibrator typu 9100 [5], o dużej obciążalności zakresu 20 A, umożliwił sprawdzanie (tylko w trybie przerywanym) mierników cęgowych do 1000 A przy stosowaniu cewki o 50-ciu zwojach. W ślad za nim pojawił się pierwszy krajowy kalibrator uniwersalny typu C101B [6], o takiej obciążalności zakresu 20 A, że umożliwia w trybie ciągłym sprawdzanie mierników cęgowych do 1000 A przy stosowaniu cewek, tak o 50-ciu zwojach, jak i o 100-tu zwojach.

Z dokonanego przeglądu wynika, że niektóre kalibratory uniwersalne, te o dużej obciążalności wyjścia prądowego, umożliwiają, przy stosowaniu odpowiednich cewek, sprawdzanie cęgowych amperomierzy lub samych cęgów prądowych z zakresami pomiarowymi do 1000 A. Natomiast przy sprawdzaniu cęgowych mierników mocy (w tym analizatorów parametrów sieci), zachodzi potrzeba stosowania kalibratorów mocy o dużej obciążalności wyjścia prądowego. Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki obciążeniowe wyjścia prądowego kalibratorów mocy typu SQ33 i C200B/233B [10]. Charakterystyka obciążeniowa kalibratora SQ33 przebiega zbyt nisko, aby mógł być stosowany do sprawdzania cęgowych mierników mocy. Natomiast charakterystyka obciążeniowa kalibratorów typu C200B/233B pozwala na sprawdzanie cęgowych mierników mocy o prądach do 1000 A przy stosowaniu różnych cewek: o 200-tu, o 100-tu i o 50-ciu zwojach.

#### LITERATURA

- [1] Miernik napięcia, prądu i mocy elektrycznej (analizator) typu Calport-100. Instrukcja obsługi. Calmet, Zielona Góra, 2000.
- [2] Hand-held test and measurement instruments for the field and the laboratory. Chauvin Arnoux, France, Ed3-04/2000.
- [3] Kalibrator SQ-10. Instrukcja serwisu. Lumel, Zielona Góra, 1986.
- [4] Kalibrator SQ7000. Instrukcja obsługi. Inmel, Zielona Góra, 1996.
- [5] User's Handbook for the Model 9100 Universal Calibration system. Wavetek, Issue 5.0, 1996.



Rys. 6. Wykresy  $U_0(I_k)$  obciążalności różnych typów kalibratorów w funkcji prądu wyjściowego kalibratora oraz wartości napięcia kalibratora, wymagane przy sprawdzaniu amperomierzy do 1000 A prądu przemiennego (oznaczenie  $U_k(1000\text{ Aac})$  symbolem koła) i stałego (oznaczenie  $U_k(1000\text{ Adc})$  symbolem kwadratu)

#### Wnioski

- Większość mierników cęgowych ma zakresy pomiaru prądu nie przekraczające wartości 1000 A. Ponieważ kalibratory generują prądy tylko do wartości 20 A, przy sprawdzaniu mierników cęgowych z zakresami powyżej 20 A, zachodzi potrzeba dodatkowego stosowania cewek.
- Podłączenie cewki do wyjścia kalibratora prądu zwiększa spadek napięcia na zaciskach kalibratora tym bardziej, im większa jest impedancja cewki – impedancja ta może być wyliczona z podanych wzorów. Objęcie cewki cęgami zwiększa impedancję cewki, zależnie od rodzaju cewki i typu cęgów, co powoduje dalsze zwiększenie spadku napięcia na zaciskach prądowych kalibratora.
- Kalibratory prądu, stosowane do sprawdzania mierników cęgowych, powinny mieć odpowiednio dużą obciążalność wyjścia – tylko niektóre kalibratory mogą sprostać zadaniu sprawdzania mierników cęgowych z zakresami do 1000 A. Z przeprowadzonej analizy wynika, że wystarczającą obciążalność mają kalibrator uniwersalny typu C101B, jednofazowy kalibrator mocy typu C200B i trójfazowy kalibrator mocy typu C233B.

- [6] Kalibrator napięć i prądów stałych i przemiennych typu C101 (wykonanie specjalne C101C z zakresem 100A prądu przemiennego). Instrukcja obsługi. Calmet, Zielona Góra, 2000.
- [7] Treszczuk R.M., Treszczuk S.A., Siedow S.A. Poluprzewodnikowyje prijemno-usilitelnyje ustrojstwa. Naukowa Dumka, Kijew, 1989.
- [8] Pomiar, regulacja, rejestracja. Przegląd produkcji. Lumel, Zielona Góra, 1997.
- [9] Kalibrator GA-1. Instrukcja obsługi. Lumel, Zielona Góra, 1981.
- [10] Olencki A., Urbański K.: Kalibratory mocy prądu przemiennego. Krajowy Kongres Metrologii KKM'98. Gdańsk, 1998, s.233...241.