

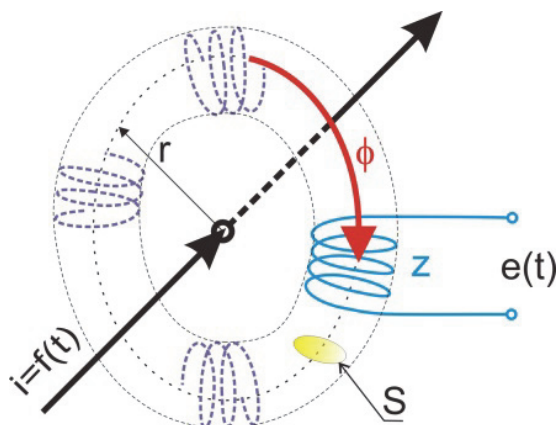
Bezrdzeniowy przetwornik prądu przemiennego

Drastycznie malejąca moc pobierana przez współczesne obwody wejściowe układów monitorowania wielkości elektrycznych i obwody elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej inspirowane do poszukiwania coraz to nowszych rozwiązań przetworników prądu przemiennego [1,2,4]. Jest oczywiste że nie wszędzie uda się zastąpić klasycznych przekładników prądowych nowymi rozwiązaniami przetworników np. cewką Rogowskiego czy też przetwornikami z czujnikami Halla. W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania zwykłej cewki powietrznej jako bardzo prostego i taniego przetwornika prąd – napięcie.

słowa kluczowe: przetwornik prądowo-napięciowy, cewka Rogowskiego, transformacja przebiegów odkształconych, monitorowanie prądu przemiennego, zabezpieczenia układów elektroenergetycznych

1. WSTĘP

Znana z wielu publikacji cewka Rogowskiego oprócz wielu oczywistych zalet charakteryzuje się kilkoma niedogodnościami do których należy zaliczyć m.in. złożony proces produkcji, koszt i ew. konieczność stosowania cewek rozłącznych w przypadku konieczności instalowania w już istniejących torach prądowych. Poza tym wyprodukowanie w miarę identycznych egzemplarzy o jednakowej stałej przekształcania wymaga stosowania techniki druku wielowarstwowego w technologii PCB HDI (ang. Printed Circuit Board High Density Interconnect).



Rys. 1. Schematyczny układ cewki Rogowskiego

Na rys. 1 przedstawiono schematyczny układ cewki Rogowskiego w której przepływający przez jej okno prąd $i(t)$ indukuje siłę elektromotoryczną $e(t)$ (1):

$$e(t) = z \frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot z \cdot S}{2\pi \cdot r} \frac{di}{dt} = M \frac{di}{dt} \quad (1)$$

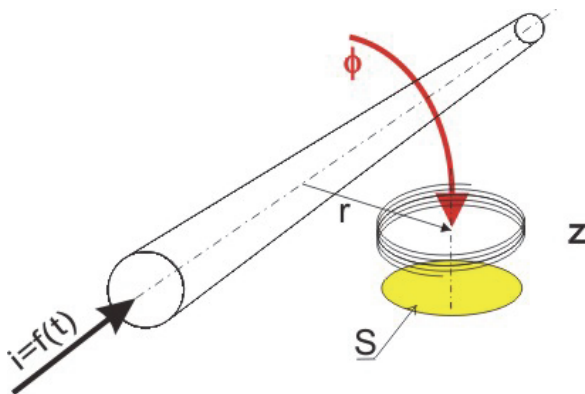
Nasuwa się pytanie czy zastąpienie cewki Rogowskiego obejmującej toroidalnie przewód z prądem $i(t)$ zwykłą cewką powietrzną o zwojach skupionych jak na rys. 2 pozwoli na wierne jego monitorowanie?

Cewka Rogowskiego z racji swojej konstrukcji jest bardziej „odporna” na działanie strumieni pasożytniczych pochodzących od sąsiednich torów prądowych niż cewka o zwojach skupionych umieszczona w pobliżu toru z monitorowanym prądem $i(t)$ a współczynnik przekształcania jest wielkością stałą.

2. CEWKA POWIETRZNA JAKO PRZETWORNIK PRĄD-NAPIĘCIE

Z racji braku magnetowodu, cewka o zwojach skupionych musi uwzględniać konieczność odpowiedniego ekranowania lub odpowiedniej konstrukcji aby zminimalizować wpływ strumieni pasożytniczych generowanych przez sąsiednie tory prądowe. Nie-

wątpliwą natomiast zaletą takiego układu – w przeciwieństwie do cewki Rogowskiego – jest możliwość płynnej regulacji współczynnika przekształcania.



Rys. 2. Proponowany układ pomiarowy z cewką o zwojach skupionych

Regulację współczynnika przekształcania w układzie przetwornika z rys. 2 można dokonać w dwojaki sposób:

- za pomocą zmiany odległości r cewki od toru prądowego,
- za pomocą zmiany kąta powierzchni cewki do linii strumienia.

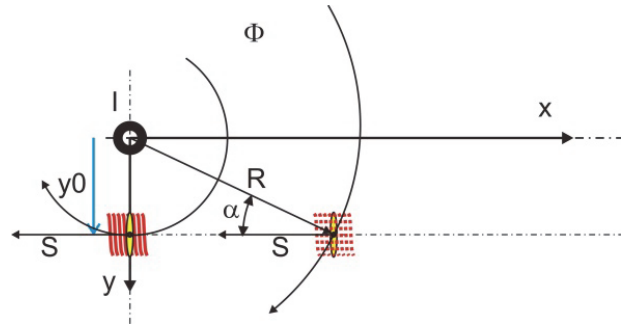
Cewka bezrdzeniowa w szczególności jest narażona na oddziaływanie strumieni pasożytniczych, co jest poważną wadą takiego sposobu monitorowania przebiegów prądów. Możliwe są dwa sposoby ograniczenia tego niekorzystnego zjawiska:

- zastosowanie różnego rodzaju konstrukcji ekranów magnetycznych zadaniem których jest wzmocnienia strumienia użytecznego a osłabienie strumienia pasożytniczego,
- zastosowanie konstrukcji z dodatkowymi cewkami kompensującymi.

Przeprowadzone badania pierwszego z w/w sposobów wykazały małą skuteczność eliminacji strumieni pasożytniczych przy jednoczesnym wzroście możliwości nasycania się obwodu dla znacznych wartości strumienia użytecznego [3], natomiast drugi sposób został zgłoszony do Urzędu Patentowego RP [5].

Badania konstrukcji wykorzystujących dodatkową cewkę kompensującą wykazały możliwość praktycznie całkowitego skompensowania wpływu strumienia pasożytniczego.

Na rys. 3 przedstawiono położenie cewki pomiarowej monitorującej prąd I w torze prądowym. Poosiowe przemieszczanie cewki jak na rysunku pozwala na określenie zmian wartości sem indukowanej w funkcji przemieszczenia x dla ustalonej wartości y odsunięcia osi cewki od toru prądowego. Odległość y zdeterminowana jest głównie względami bezpieczeństwa.



Rys. 3. Schemat usytuowania cewki w stosunku do toru prądowego z prądem I

Zależność opisująca wartość sem indukowanej w cewce w funkcji odległości x i y pozwoli na optymalny dobór parametrów przetwornika:

- y_0 – możliwie największej wartości sygnału użytecznego przy zachowaniu odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa;
- $x \neq 0$ – wyznaczenie wartości sem pasożytniczej indukowanej w cewce.

Wartość sem $e(t)$ indukowanej w cewce z rys. 3 wynosi:

$$e(t) = \frac{\mu_0 * z * S * \sin \alpha}{2 * \pi * R} * \frac{di}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} ; \quad S' = S * \sin \alpha = S * \frac{y}{R}$$

Ostatecznie wartość skuteczną siły sem E_{sk} indukowanej w układzie z rysunku 3 w zależności od położenia i wartości prądu można obliczyć z zależności (3).

$$E_{sk} = S * z * \frac{y}{y^2 + x^2} * c * I_{sk}, \quad (3)$$

gdzie:

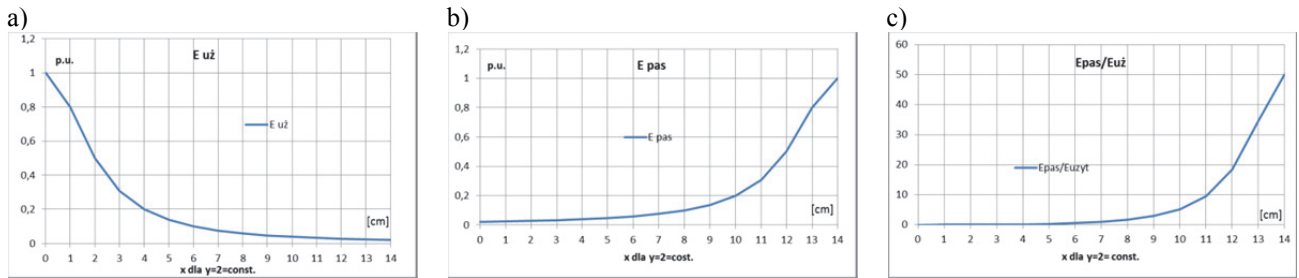
c – stała [V / A·m].

Zależność (3) pozwala na wyznaczenie zarówno wartości sygnału użytecznego (dla $x=0$) jak wartości sygnału pasożytniczego indukowanego od prądu toru sąsiedniego odległego od cewki o wartość x .

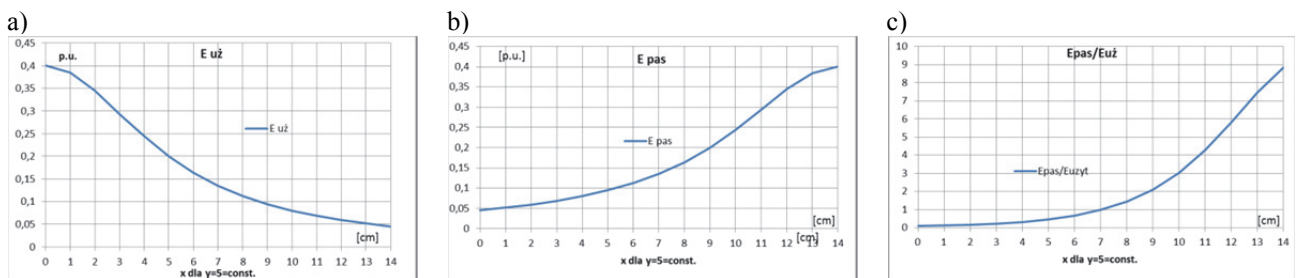
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji układu widocznego na rysunku 3.

Symulację przeprowadzono przy następujących założeniach:

- odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi torami $X_{max} = 14 \text{ cm} = \text{const.}$,
- przyjęto wartość $E_{max} = 1$ p.u. indukowanej w cewce podstawowej dla ustalonej wartości $y_0 = 2 \text{ cm}$ (cewka dotyka do toru).



Rys. 4. Przebieg indukowanej w cewce toru 1 sem w funkcji odległości x przy $y_0 = \text{const.} = 2$ cm. sem użytecznej indukowanej w cewce C1 od prądu I1 (rys. 6), sem pasożytniczej indukowanej w cewce C1 od prądu $I_2 = I_1$ (rys. 6), stosunek wartości sygnału pasożytniczego do użytecznego (E_{pas}/E_{uz})

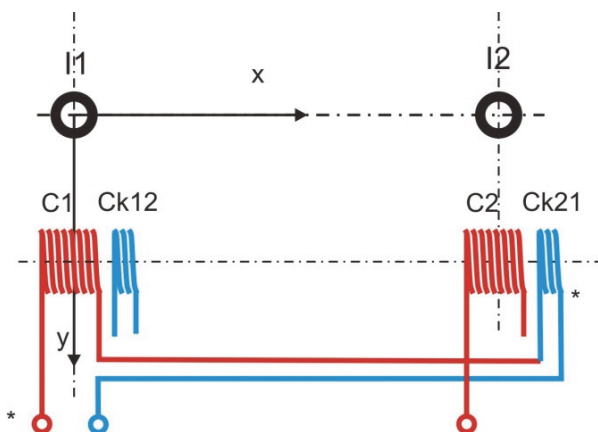


Rys. 5. Przebieg indukowanej w cewce toru 1 sem w funkcji odległości x przy $y = \text{const.} = 5$ cm

Na rys 5 przedstawiono wyniki symulacji układu z rys 3 dla zwiększonej wartości odległości y przetwornika od toru ($y = 5$ cm).

Odsunięcie przetwornika o 3 cm w stosunku do poprzedniego położenia zmniejsza wartość sygnału użytecznego z 1,0 p.u. do 0,4 p.u. Wzrasta natomiast wartość sygnału pasożytniczego z 0,02 p.u. do 0,04 p.u.

Na rysunku 6 przedstawiono ideę działania przetwornika w układzie dwutorowym. Przykładowy skompensowany przetwornik wykorzystuje dwie cewki: jedną podstawową C1 i drugą kompensującą Ck12.



Rys. 6 Idea kompensacji sygnału pasożytniczego w układzie dwutorowym

Z wykresu 4b można wyznaczyć liczbę zwojów cewki kompensującej Ck21 aby skompensować wpływ toru drugiego na cewkę C1.

I tak w cewce podstawowej C1 umieszczonej pod torem I1 ($x=0$) w odległości $y_0=2$ cm przy rozstawieniu torów $X_{\text{max}} = 14$ cm od toru I1 indukuje się sem użyteczne $E_{uz} = 1$ p.u. natomiast od toru I2 indukuje się sem pasożytnicze $E_{pas} = 0,02$ p.u. W związku z powyższym cewka kompensująca Ck21 powinna mieć 0,02 liczby zwojów cewki podstawowej. Tak korzystne wyniki okupione są pogorszeniem bezpieczeństwa (bliska odległość cewek od torów prądowych).

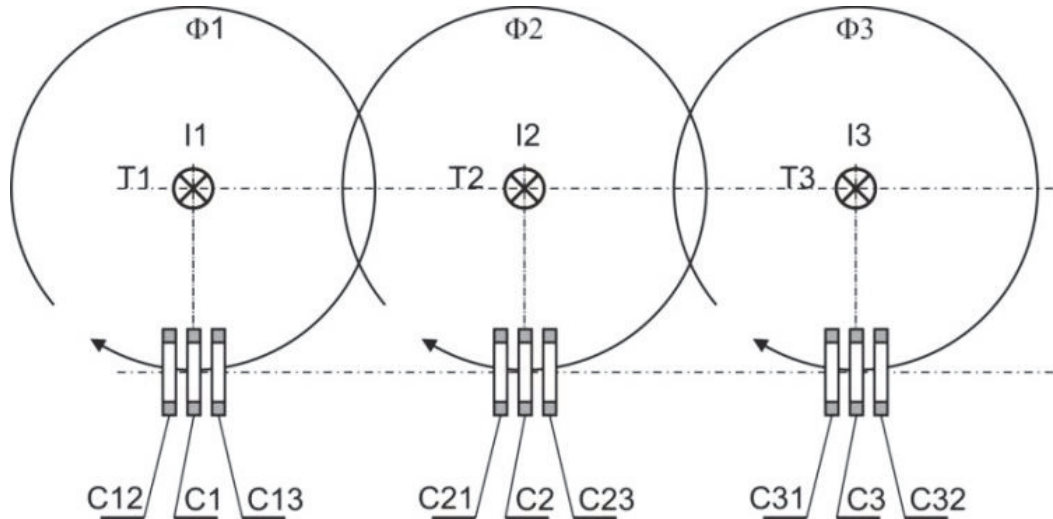
Odsunięcie takiego przetwornika od toru poprawia bezpieczeństwo kosztem zmniejszenia wartości jego sygnału użytecznego i wzrostu sygnału pasożytniczego.

W cewce podstawowej C1 indukuje się sem użyteczna od prądu I1 oraz sem pasożytnicza od prądu I2 toru sąsiedniego. Znając odległość X pomiędzy torami za pomocą zależności (3) można wyliczyć wartość tej sem pasożytniczej a następnie odjąć ją od sem użytecznej wykorzystując w tym celu sygnał kompensujący cewki Ck21 usytuowanej pod torem z prądem I2. Cewka kompensująca może być wykonana identycznie jak cewka podstawowa z tą tylko różnicą że posiada o wiele mniejszą liczbę zwojów możliwą do dokładnego określenia dla zadanej odległości pomiędzy torami. Korzystnym byłoby wykorzystanie w takich przetwornikach cewek drukowanych wykonanych metodą druku wielowarstwowego PCB HDI.

Jest oczywistą rzeczą że rozwiązanie takie nadaje się głównie do układów szynowych. Na rysunku 7 przedstawiono układ monitorowania prądów w trój-

fazowym systemie szyn zbiorczych. Każdy ze skompensowanych przetworników zawiera po dwie cewki kompensujące. Cewki podstawowe oznaczone są pojedynczym indeksem odpowiadającym numerowi toru T z monitorowanym prądem. Cewki kompensu-

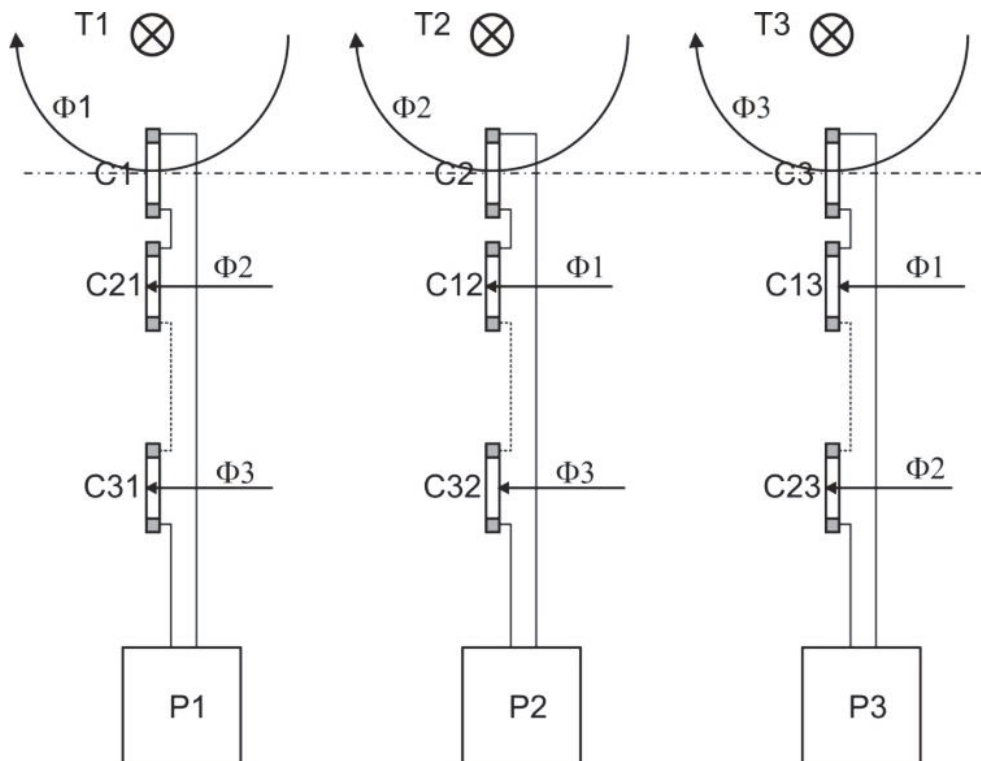
jące oznaczone są dwucyfrowym indeksem, przy czym pierwsza cyfra informuje który tor prądowy indukuje w niej sem, a druga informuje do którego układu pomiarowego P powinna być dołączona.



Rys. 7 Przetworniki skompensowane w układzie trójfazowym

Obwody pomiarowe uwzględniające wpływ pozostałych faz sąsiadnych na cewkę pomiarową danego toru przedstawiono na rys.8. I tak przykładowo, jeśli strumień Φ2 toru T2 indukuje w cewce podstawowej

C1 toru T1 napięcie pasożytnicze, to cewka kompensująca C21 umieszczona pod torem T2 odejmuje taką samą wartość z uwzględnieniem przesunięcia fazowego przebiegów toru T2.



Rys. 8 Schemat połączeń cewek kompensujących przetworników skompensowanych w układzie trójfazowym

Do bloków pomiarowych (monitorujących) P każdej z faz doprowadzona jest suma sem użytecznej danej fazy i różnica sem pasożytniczych pozostałych faz (rys. 8).

W symetrycznie ułożonych układach szynowych (jak na rys. 7, 8) kompensujące cewki ($C12 = C21 = C23 = C32$) są identyczne. Natomiast cewki kompensujące umieszczone pod szynami skrajnymi są odpowiednio takie same ($C13 = C31$). Reasumując, trójfazowy układ pomiarowy prądów wykorzystujący taki przetwornik skompensowany zawierałby:

- 3 identyczne cewki podstawowe $C1, C2, C3$,
- 2 identyczne cewki kompensujące ($C13$ i $C31$),
- 4 identyczne cewki kompensujące ($C12, C21, C23, C32$)

3. BADANIA MODELOWE

Transformacja przebiegów odkształconych.

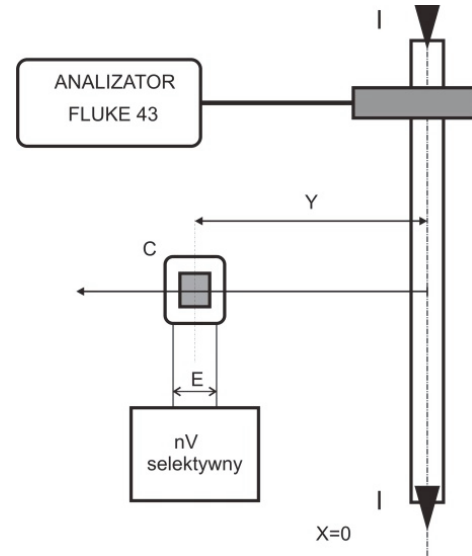
Transformacja przebiegów odkształconych w prezentowanym przetworniku przebiega podobnie jak w cewkach Rogowskiego; sem cewki jest pochodną prądu a wyższe harmoniczne k -tych rzędów transformowane są ze współczynnikiem transformacji k -krotnie większym niż dla podstawowej harmonicznej [4].

Jako cewkę podstawową wykorzystano bezrdzeniową cewkę stycznika SM-3 o liczbie zwojów $z = 6500$.



Rys. 9 Cewka użyta do badań modelowych

Badania przeprowadzono w układzie z rys 10. Przy ustalonej odległości $y = \text{const}$. cewki C od toru prądowego wymuszono przepływ prądu przemiennego o stałej wartości skutecznej. Harmoniczne w prądzie mierzono za pomocą analizatora Fluke 43 a harmoniczne w sem indukowanej w cewce C za pomocą nanowoltomierza selektywnego. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1 (dla $y = 15$ cm) i tabeli 2 (dla $y = 10$ cm).



Rys. 10 Układ pomiarowy do zdejmowania charakterystyk transformacji wyższych harmonicznych prądu

Tabela 1.

Wyniki pomiarów dla prądu $I_{sk} = 101,6$ A; $y = 15$ cm =const.

k	I_k	E_k	$n_k = E_k / I_k$	n_k / n_1
-	A	mV	mV/A	
-	101,6			
1	100,8	100,0	0,99	1
3	4,2	11,8	2,81	2,81
5	1,3	6,5	5,0	5,05
7	1,6	11,5	7,18	7,25

Tabela 2.

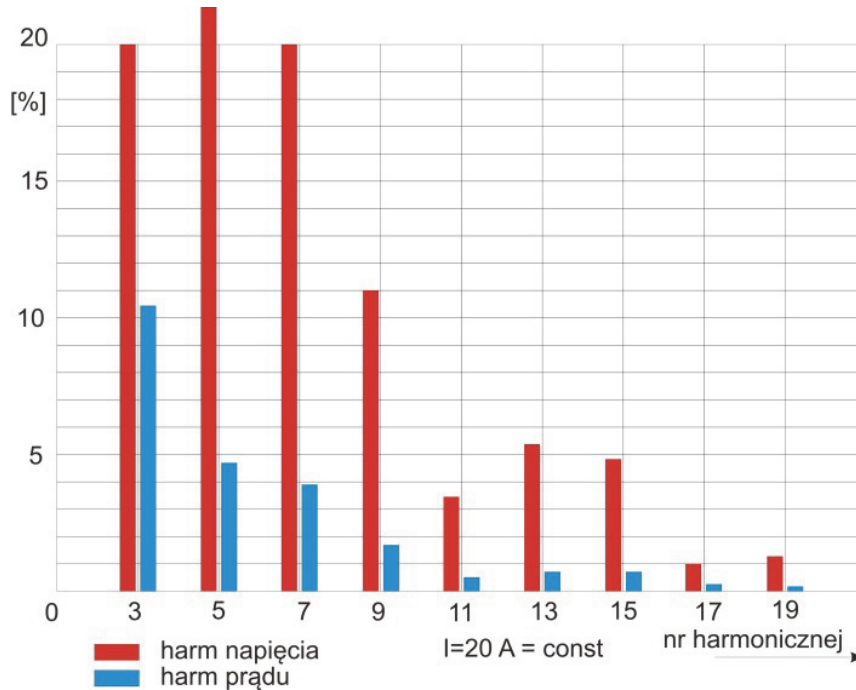
Wyniki pomiarów dla $I_{sk} = 48,9$ A; $y = 10$ cm =const.

k	I_k	E_k	$n_k = E_k / I_k$	n_k / n_1
-	A	mV	mV/A	
-	48,9			
1	48,6	94,0	1,93	1
3	2,5	13,5	5,4	2,80
5	1,1	11,5	10,45	5,41
7	1,1	15,5	14,09	7,3

gdzie: I_k, E_k – odpowiednio wartości skuteczne k -tych harmonicznych prądu i sem, n_1, n_k – współczynniki przekształcania odpowiednio 1. i k -tej harmonicznej.

Wyniki pomiarów potwierdzają efekt k -krotnego wzmacniania k -tej harmonicznej prądu w odniesieniu do wartości współczynnika przekształcania dla podstawowej harmonicznej.

W kolejnym etapie badań wyznaczono zależność zmian współczynnika przekształcania podstawowej harmonicznej n_1 jako funkcję odległości y cewki od toru prądowego a wyniki przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 11 Przykładowy rozkład harmonicznych zmierzonych w prądzie o wartości skutecznej $I=20\text{ A}$ odniesionych do wartości podstawowej harmonicznej oraz zmierzonych wartości sem cewki

Tabela 3.
Wyniki pomiarów sem E1 (1-sza harmoniczna) indukowanej w cewce przy $I_{sk}=19,21\text{ A} = \text{const}$ w funkcji odległości y od toru prądowego.

$I_{sk} = \text{const}$	E_1	y	n_1
A	mV	cm	mV/A
19,21	100,0	5	5,20
19,21	80,0	6	4,16
19,21	62,0	7	3,23
19,21	51,0	8	2,65
19,21	43,0	9	2,24
19,21	36,0	10	1,87

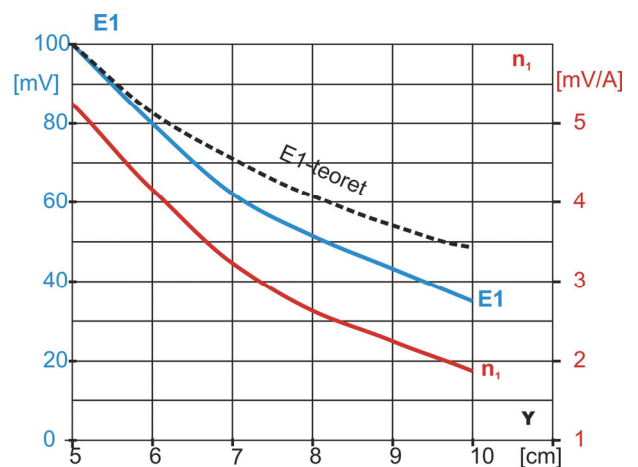
gdzie: n_1 – stała przekształcania dla podstawowej harmonicznej, E_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej w indukowanej w cewce sem.

Na rys. 12 przedstawiono wykres zmian wielkości E_1 i wartości współczynnika przekształcania n_1 pierwszej harmonicznej prądu w funkcji odległości y cewki od toru prądowego.

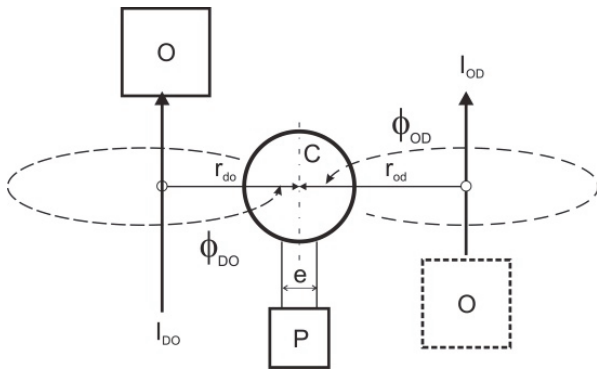
W odróżnieniu od cewek Rogowskiego prezentowana konstrukcja umożliwia płynną regulację współczynnika przekształcania n_1 .

Ta cecha predysponowałaby przetwornik do zastosowań w zabezpieczeniach różnicowo-prądowych. Na rysunku 13 przedstawiono ideę zabezpieczenia różnicowego pojedynczego toru prądowego z wykorzystaniem takiego przetwornika. Zarówno

prąd dopływający I_{DO} do obiektu zabezpieczonego O jak i prąd odpływający I_{OD} wytwarzają odpowiednio strumienie Φ_{DO} i Φ_{OD} . Zgodnie z zal. 1 w cewce pomiarowej C indukują się dwie siły elektromotoryczne o przeciwnych sobie fazach. Przemieszczanie cewki w kierunku jednego lub drugiego toru prądowego pozwala na osiągnięcie całkowitej kompensacji obu sił elektromotorycznych. Zachwianie stanu równowagi poprzez prąd upływu w strefie chronionej spowoduje wystąpienie sem e która pobudzi człon pomiarowy P .

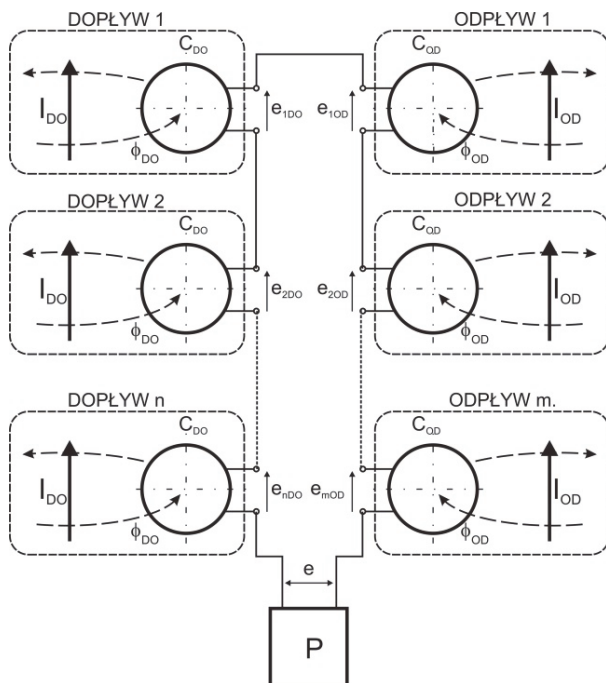


Rys. 12 Wykres zmierzonych wielkości E_1 i n_1 w funkcji odległości y . Przerywana krzywa sem E_1 wyznaczona teoretycznie wg zależności 3



Rys. 13 Idea układu zabezpieczenia różnicowo-prądowego jednego toru prądowego

Na rys 14 przedstawiono ideę zabezpieczenia układu szyn zbiorczych od zwarć doziemnych.



Rys. 14 Idea układu zabezpieczenia od zwarć doziemnych jednego toru prądowego układu szyn zbiorczych

Sumowanie wszystkich prądów dopływających i odpływających odbywa w układzie sumowania sem indukowanych w poszczególnych cewkach pól dopływowych i odpływowych tej samej fazy.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Do podstawowych zalet przetwornika należy zaliczyć możliwość płynnej regulacji wartości współczynnika przekształcania oraz łatwość montażu bez konieczności rozpinania torów prądowych.
2. Przetworniki te dedykowane są głównie w zastosowaniu do układów szynowych o stałej wartości wzajemnego odsunięcia torów prądowych.
3. Wyposażenie przetworników w cewki kompensujące pozwala na całkowitą eliminację wpływu strumieni pasożytniczych pochodzących od sąsiednich torów prądowych.
4. Przetwornik bezrdzeniowy w postaci cewki powietrznej może stanowić cenne uzupełnienie gammy przetworników prądowych wykorzystywanych zarówno w układach monitoringu jak i zabezpieczeń układów elektroenergetycznych.

Literatura

1. Habrych M., Lubryka J., Macierzyński D., Kozłowski A., Morawiec M.: Przetwornik prądowo-napięciowy ze zmodyfikowanym rdzeniem amorficznym do pomiarów prądowych przebiegów odkształconych. *Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa* 10(500), 2013, str.24-29.
2. [2] Miedziński B., Szkółka S., Wiśniewski G., Lisowiec A.: Cewki Rogowskiego jako elementy nowoczesnych układów automatyki i pomiarów; *Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa* 2(433), 2008 str. 23-30.
3. Ponitka T.: Układ do monitorowania prądu przemiennego. Praca inżynierska. Politechnika Wroclawska. Wydział Elektryczny. Automatyka i Sterowanie w Energetyce. Wrocław 2014.
4. Szkółka S., Wiśniewski G.: Rogowski coil as a modern sensor for monitoring of current. *Przegląd Elektrotechniczny* 1, 2009 str. 131-135.
5. Szkółka S.: Patent submission P. 412018: Method for measuring currents in electrical power multi-phase elements and a current-voltage transducer to employ the method.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.