

## TRANSFER ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH PRZEWODZONYCH W TRANSFORMATOROWYCH PRZETWORNIKACH POMIAROWYCH

Jarosław ŁUSZCZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel: (+48) 58 347 2534, fax: (+48) 58 341 0880, e-mail: j.luszcz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Badania eksperymentalne propagacji zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych oraz jakości energii często wymagają stosowania przekładników przetworników pomiarowych. W referacie przedstawiono podstawowe zjawiska wpływające na właściwości przekładników w zakresie częstotliwości zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych. Zaproponowano uproszczony szerokopasmowy model obwodowy przekładnika uwzględniający występujące podstawowe mechanizmy sprzężeń, który pozwala na przybliżone określenie charakterystyk przenoszenia przekładników w różnych zakresach częstotliwości. Przeprowadzone analizy zostały zweryfikowane poprzez badania eksperymentalne przeprowadzone dla różnych przekładników napięciowych. Uzyskane wyniki potwierdzają występowanie istotnych zmian charakterystyk częstotliwościowych przenoszenia przekładników napięciowych w szczególności w zakresie częstotliwości zaburzeń przewodzonych.

**Słowa kluczowe:** zaburzenia elektromagnetyczne przewodzone, przetworniki pomiarowe.

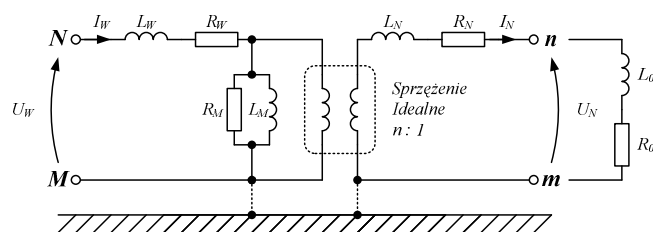
### 1. WPROWADZENIE

Zagadnienia związane z pomiarami jakości energii elektrycznej dostarczanej przez system elektroenergetyczny są obecnie jednym z ważniejszych problemów coraz częściej występujących w relacjach pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii. Znaczna liczba współcześnie eksploatowanych odbiorników energii, zarówno małych i dużych mocy ma charakter nieliniowy, co powoduje, że pobierany przez nie prąd jest odkształcony i oprócz składowej podstawowej (50Hz) zawiera również składowe harmoniczne. Składowe harmoniczne prądów pobieranych z sieci elektroenergetycznej powodują wytwarzanie zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych, które są przyczyną występowania wielu niekorzystnych zjawisk w systemie elektroenergetycznym i może stanowić istotne zagrożenie dla poprawnego działania zasilanych urządzeń oraz systemów pomiarowych i automatyki. Różnorodne badania jakości energii oraz propagacji zaburzeń elektromagnetycznych przewodzonych wymagają przeprowadzania złożonych pomiarów. W przypadku sieci wyższych napięć pomiary te są często

wykonywane z wykorzystaniem przekładników napięciowych, których właściwości pomiarowe w zakresie częstotliwości składowych harmonicznym wyższych rzędów nie są uwzględniane. W zależności od poziomu i charakterystyki widmowej zniekształceń występujących w badanym układzie oraz rodzaju zastosowanych przekładników, może to prowadzić do istotnych rozbieżności w uzyskiwanych wynikach.

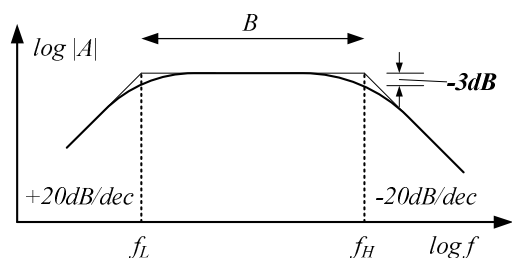
### 2. KLASYCZNY MODEL OBWODOWY PRZEKŁADNIKA

Przekładniki stosowane w układach pomiarowych wyższych napięć są transformatorami dwuuzwojeniowymi o specjalnej konstrukcji wynikającej z potrzeby zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości napięciowej długotrwałej i udarowej oraz przekładni napięciowej. W zakresie częstotliwości zbliżonych do sieciowych modelowanie przekładników przeprowadza się przy pomocy klasycznego modelu obwodowego uwzględniającego indukcyjności rozprożeń oraz straty mocy. Na rysunku 1 przedstawiono klasyczny model obwodowy przekładnika, jako transformatora dwuuzwojeniowego, który uwzględnia następujące właściwości: indukcyjność magnesowania  $L_M$ , straty w obwodzie magnetycznym reprezentowane przez rezystancję zastępczą  $R_M$ , indukcyjności rozproszenia strony pierwotnej  $L_W$  i wtórnej  $L_N$ , straty w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym reprezentowane przez rezystancje  $R_W$  i  $R_N$ .



Rys. 1. Model obwodowy przekładnika napięciowego dla częstotliwości zbliżonych do sieciowej

Parametry modelu klasycznego wyznacza się na podstawie pomiarów wykonywanych przy próbie biegu jałowego i zwarcia przy zasilaniu napięciem o częstotliwości sieciowej. Analiza częstotliwościowa przeprowadzona w oparciu o taki model pozwala na określenie charakterystyki przenoszenia oraz charakterystycznych częstotliwości granicznych określających szerokość pasma przenoszenia (Rys.2). Dolne ograniczenie pasma przenoszenia  $f_L$  przekładnika wynika ze stałych czasowych związanych z obwodem magnesowania ( $L_M, R_M$ ) oraz obciążenia ( $L_O, R_O$ ). Natomiast górna częstotliwość graniczna charakterystyki przenoszenia  $f_H$  związana jest ze stałą czasową obwodu złożonego z impedancji rozproszenia ( $L_R, R_R$ ) oraz obciążenia ( $L_O, R_O$ ). Zakładając pracę przekładnika z zakresu charakterystyki liniowej oraz uwzględniając zależności (1), (2), (3) i (4), można wyznaczyć zależności określające szerokość pasma przenoszenia  $k_B$  zależną od wartości i charakteru obciążenia (5).



Rys. 2. Uproszczona charakterystyka częstotliwościowa przekładnika

$$L_R = L_W + n^2 L_N \quad R_R = R_W + n^2 R_N \quad (1),(2)$$

$$R'_O = n^2 R_O \quad L'_O = n^2 L_O \quad (3),(4)$$

$$k_B = \frac{f_H}{f_L} = \frac{L_M L'_O}{(L_R + L'_O)(L_M + L'_O)} \frac{(R_R + R'_O)(R_M + R'_O)}{R_M R'_O} \quad (5)$$

Przedstawiona analiza pozwala jednak jedynie na przybliżone oszacowanie zakresu częstotliwości liniowej charakterystyki przenoszenia, ponieważ nie uwzględnia zmian wartości parametrów przyjętego modelu przekładnika dla wyższych częstotliwości. W przypadku występowania składowych harmonicznich o znacznie wyższych częstotliwościach szczególnie istotny wpływ na zmiany charakterystyk częstotliwościowych przenoszenia mają również pojemności pasożytnicze występujące w uzwojeniach i elementach konstrukcyjnych przekładnika.

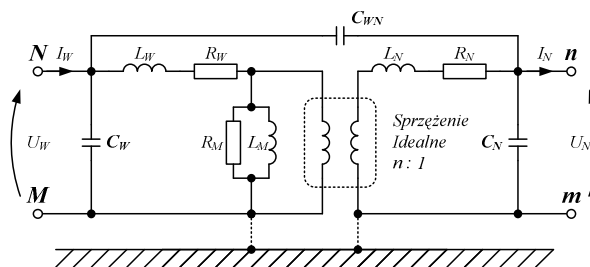
### 3. WŁAŚCIWOŚCI PRZEKŁADNIKÓW W ZAKRESIE WYŻSZYCH CZĘSTOTLIWOŚCI

Analiza właściwości przekładników w szerokim zakresie częstotliwości wymaga uwzględniania dodatkowych zjawisk, które w znaczącym stopniu wpływają na zmiany charakterystyki przenoszenia. Podstawową przyczyną istotnych zmian charakterystyki częstotliwościowej przenoszenia już przy stosunkowo niewielkim wzroście częstotliwości przenoszonych

sygnałów jest występowanie pojemności pasożytniczych uzwojeń. W zakresie wyższych częstotliwości również inne zjawiska mogą wpływać na zmiany charakterystyki przenoszenia, możemy do nich zaliczyć między innymi: zjawisko naskórkowości, efekt zbliżeniowe, zjawiska falowe. W przypadku analizy właściwości przekładników w zakresie częstotliwości dolnego pasma zaburzeń przewodzonych (CISPR A) i niższych, analizy można ograniczyć jedynie do pojemności pasożytniczych.

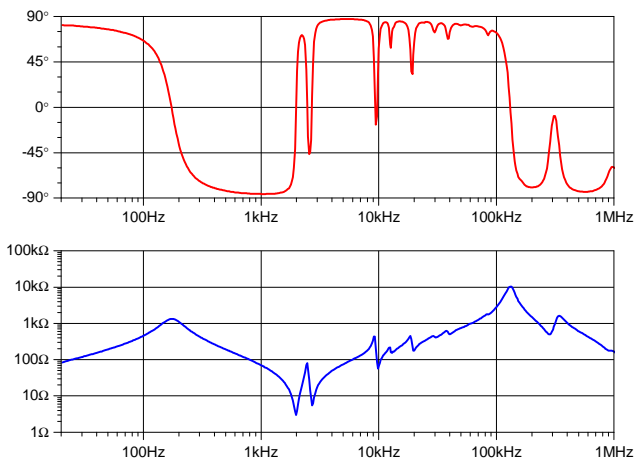
Dokładny rozkład wszystkich pojemności pasożytniczych występujących w uzwojeniach transformatorów ma charakter rozłożony, zależy od wielu szczegółowych parametrów konstrukcyjnych uzwojeń i jest dość trudny do określenia. W zakresie częstotliwości, poniżej kilku kHz, można jednak skutecznie modelować wpływ pojemności pasożytniczych poprzez określanie pojemności zastępczych skupionych umownie dołączanych do zacisków uzwojeń [1, 2, 3, 4, 5]. Natomiast w zakresie dużo większych częstotliwości, powyżej 1 MHz, niezbędne jest również uwzględnianie efektu nierównomiernego rozłożenia pojemności cząstkowych wzdłuż uzwojeń. Wpływ pojemności pasożytniczych, w szczególności dla przekładników pomiarowych, jest również bardzo uzależniony od konfiguracji uziemień strony pierwotnej i wtórnej.

Ze względu na znaczne utrudnienia związane z identyfikacją wartości pojemności doziemnych w przypadku uzwojeń odseparowanych całkowicie od potencjału ziemi, przeprowadzone analizy ograniczono do układu z dwoma uzwojeniami uziemionymi jednostronnie. W takim układzie występujące pojemności pasożytnicze uzwojeń przekładnika można przedstawić jako trzy pojemności zastępcze skupione (Rys.3): pojemność własna uzwojenia pierwotnego  $C_W$ , pojemność własna uzwojenia wtórnego  $C_N$ , pojemność międzyuzwojeniowa  $C_{WN}$ .



Rys. 3. Schemat zastępczy przekładnika napięciowego uwzględniający pojemności pasożytnicze uzwojeń

Parametry przedstawionego schematu zastępczego można wyznaczyć w oparciu o analizę charakterystyk częstotliwościowych napięciowo – prądowych (Rys. 4), wyznaczonych w układach pomiarowych analogicznych do próby biegu jałowego i zwarcia w wymaganym zakresie częstotliwości [2, 3]. Identyfikacja częstotliwości rezonansowych przekładnika pozwala na określenie wartości zastępczych pojemności pasożytniczych uzwojeń własnych i międzyuzwojeniowych modelu obwodowego przekładnika.

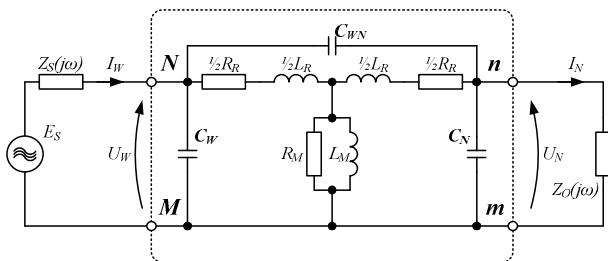


Rys. 4. Charakterystyka amplitudowo fazowa biegu jałowego przekładnika

#### 4. SZEROKOPASMOWE MODELOWANIE PRZEKŁADNIKÓW NAPIĘCIOWYCH

Szerokopasmowe właściwości przekładników można analizować wykorzystując czwórnikowe parametry łańcuchowe zgodnie z zależnością (6). W oparciu topologię modelu obwodowego przedstawionego na rysunku 5 można wyznaczyć analityczne zależności na współczynniki  $A(j\omega)$ ,  $B(j\omega)$ ,  $C(j\omega)$  i  $D(j\omega)$  macierzy czwórnikowej, co pozwala na dalsze wyznaczanie pożądanych charakterystyk częstotliwościowych w funkcji parametrów przekładnika.

$$\begin{bmatrix} U_w(j\omega) \\ I_w(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(j\omega) & B(j\omega) \\ C(j\omega) & D(j\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_N(j\omega) \\ I_N(j\omega) \end{bmatrix} \quad (6)$$



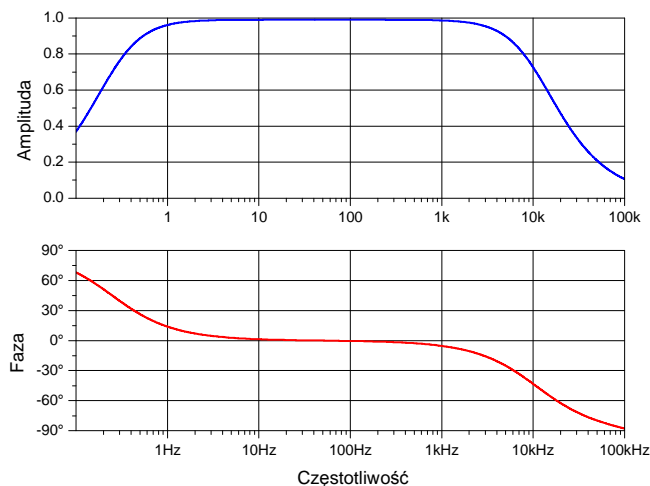
Rys. 5. Szerokopasmowy model czwórnikowy przekładnika napięciowego

Jedną z podstawowych charakterystyk przekładnika napięciowego jest amplitudowo fazowa charakterystyka przenoszenia (transmitancja)  $T(j\omega) = \frac{U_N(j\omega)}{U_w(j\omega)}$  wyrażona poprzez parametry czwórnikowe. Na wypadkowy przebieg charakterystyki przenoszenia mają również wpływ impedancje obciążenia i źródła napięcia zależne od częstotliwości, co znacznie komplikuje analizę. Uproszczając, można jednak założyć, że impedancja sieci elektroenergetycznej dla składowych harmonicznych jest znacznie mniejsza od impedancji wejściowej przekładnika (7), co pozwala na przedstawienie transmitancji przekładnika w postaci zależności (8). Opracowany model obwodowy umożliwia analityczne wyznaczanie charakterystyk przenoszenia przekładnika oraz określanie wpływu poszczególnych parametrów modelu i obciążenia na ich zmiany. Przykładowa amplitudowa i fazowa

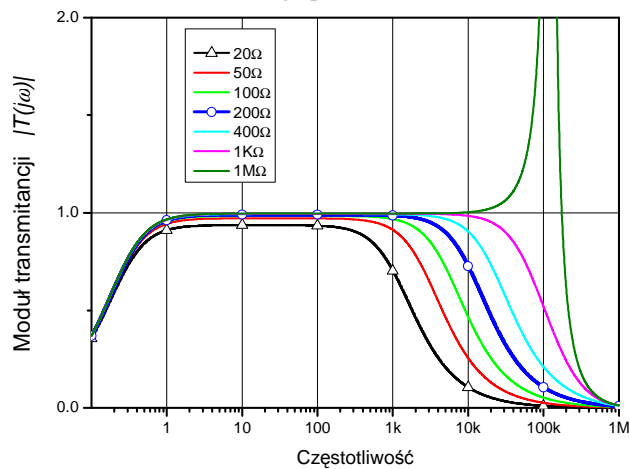
charakterystyka przenoszenia badanego przekładnika przedstawiona została na rysunku 6, natomiast wpływ wartości obciążenia rezystancyjnego na zmiany szerokości pasma przenoszenia na rysunku 7.

$$Z_{IN}(j\omega) = \frac{AZ_o + B}{CZ_o + D} \quad (7)$$

$$T(j\omega) = \frac{U_N(j\omega)}{U_w(j\omega)} = \frac{Z_o(A-1)}{Z_o(B^2 + A+1) + AB - B} \quad (8)$$



Rys. 6. Amplitudowo fazowa charakterystyka przenoszenia badanego przekładnika

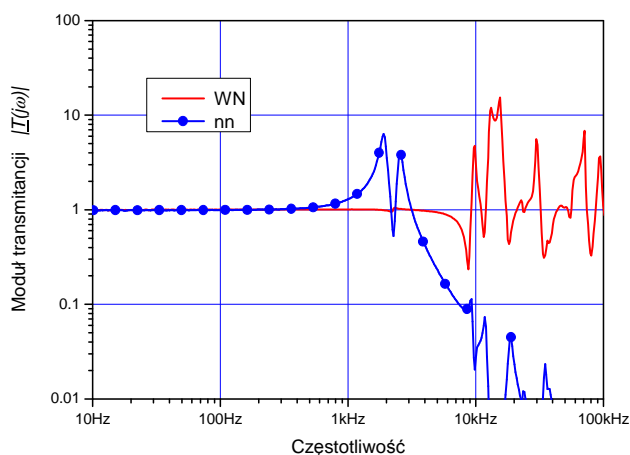


Rys. 7. Wpływ obciążenia rezystancyjnego na szerokość pasma przenoszenia przekładnika, 200Ω - obciążenie znamionowe.

Uzyskane wyniki symulacyjne dla obciążenia rezystancyjnego wykazują, że szerokość pasma przenoszenia zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia, dlatego praca przekładnika przy obciążeniach rezystancyjnych mniejszych od znamionowych powoduje zmniejszenie błędów pomiarowych w zakresie wyższych harmonicznych. Jednak zbyt małe obciążenie powoduje znaczące odkształcenie charakterystyki przenoszenia w zakresie górnej części pasma przenoszenia, ze względu na zmniejszenie tłumienia w obwodzie. W oparciu o opracowany model oraz przedstawione analizy można wyznaczyć taki zakres obciążeń, który pozwala na minimalizację zmian charakterystyk przenoszenia w jak najszerszym zakresie pasma częstotliwości.

#### 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZEKŁADNIKÓW NAPIĘCIOWYCH

Zasadniczym problemem przy badaniach eksperymentalnych charakterystyk przenoszenia przekładników jest wytwarzanie odpowiednich testowych przebiegów napięciowych w całym zakresie częstotliwości pomiarowych. Ze względu na znaczną przekładnię zwojową, zazwyczaj występującą w przekładnikach napięciowych, ich charakterystyki przenoszenia mierzone od strony uzwojenia wysokiego (WN) i niskiego (nn) są znacząco różne, co bardzo komplikuje eksperymentalne badania identyfikacyjne. Przykładowe amplitudowe charakterystyki przenoszenia badanego przekładnika napięciowego (15kV / 100V / 50VA / 0,5%) zmierzone przy zasilaniu od strony WN i nn przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Znormalizowana charakterystyka przenoszenia przekładnika przy zasilaniu od strony pierwotnej (WN) i wtórnej (nn)

Asymetria charakterystyk przenoszenia dla badanego przekładnika jest zauważalna w zakresie częstotliwości powyżej kilku kHz. W zakresie częstotliwości powyżej około 10 kHz występują liczne częstotliwości rezonansowe związane z pojemnościami własnymi i doziemnymi uzwojeń przekładnika. Przeprowadzone analizy oraz badania eksperymentalne właściwości szerokopasmowych przekładnika wykazują, że można wyróżnić trzy charakterystyczne zakresy częstotliwości związane z ich właściwościami:

- zakres niskich częstotliwości LF (poniżej kilkuset Hz), w którym charakterystyka przenoszenia jest prawie niezmienna,
- zakres średnich częstotliwości MF (od kilkuset Hz do kilku kHz), w którym o charakterystyce przenoszenia decydują częstotliwości rezonansowe związane z pojemnościami uzwojeń, a jej charakter może być zarówno tłumiący jak i wzmacniający,

- zakres wysokich częstotliwości HF (powyżej kilku kHz), w którym występują znaczne wahania charakterystyki przenoszenia wynikające z licznych częstotliwości rezonansowych związanych z rozkładem pojemności pasozytnicznych.

## 6. PODSUMOWANIE

Przedstawione analizy oraz opracowany szerokopasmowy model obwodowy przekładnika napięciowego pozwalają wyjaśnić mechanizmy sprzężeń pojemnościowych występujących w układach transformatorowych i ich wpływ na szerokość pasma przenoszenia przekładników. Wyniki z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazują, że w zakresie częstotliwości standardowo przeprowadzanych analiz składowych harmonicznych (do 2 kHz), związanych z określaniem parametrów jakości energii, przekładniki napięciowe mogą stanowić przyczynę znacznych błędów pomiarowych. Z przeprowadzonych analiz oraz pomiarów eksperymentalnych wynika, że odkształcenia charakterystyki przenoszenia związane są przede wszystkim z częstotliwością rezonansową obwodu magnesowania, przy której mogą występować największe niedokładności pomiarowe.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Brzeziński R., Piontek S.: Wpływ harmonicznych na przekładnię przekładnika średniego napięcia. VIII Konferencja Szkoła Elektrotechnika – Prądy Niesinusoidalne. EPN 2006.
- Łuszcz J.: Conducted EMI propagation modelling in the wound components. Seventeenth International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC 2004.
- Łuszcz J.; Iron Core Inductor High Frequency Circuit Model for EMC Application. Coil Winding International & Electrical Insulation Magazine. Volume 28, Issue 1, 2004.
- Shibuya, Y.; Fujita, S.; High frequency model and transient response of transformer windings, Transmission and Distribution Conference 2002: 6-10 Oct. 2002 Page(s):1839 - 1844 vol.3.
- Vermeulen, H.J.; Dann, L.R.; van Rooijen, J.; Equivalent circuit modelling of a capacitive voltage transformer for power system harmonic frequencies, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 10, Issue 4, Oct. 1995 Page(s):1743 – 1749.

## CONDUCTED EMI TRANSFER THROUGH THE INSTRUMENT TRANSFORMERS

Many problems related to the voltage and current harmonics imposed in the contemporary power system are observed nowadays. The paper presents the voltage harmonic transfer capability of the instrument transformer used in the power quality measurement systems. The adequate simplified lumped circuit model of the instrument voltage transformer is proposed and verified by the experimental investigation.