

Krzysztof TOMALCZYK

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź

Modelowanie obwodowe transformatora piezoelektrycznego w warunkach podwyższonych napięć i temperatur

Mgr inż. Krzysztof TOMALCZYK

Krzysztof Tomalczyk ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej na kierunku Elektronika i Telekomunikacja w zakresie energoelektroniki. Od 2003 roku pracuje w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej na stanowisku asystenta. Główne zainteresowania i tematyka prac badawczych to układy przetwornic energii elektrycznej oparte na elementach półprzewodnikowych oraz przetwornikach piezoelektrycznych.



e-mail: krzysztof.tomalczyk@p.lodz.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy modelowania obwodowego transformatorów piezoelektrycznych (PT) przy napięciach i temperaturach zbliżonych do panujących w rzeczywistych warunkach ich pracy. Typowe metody modelowania PT wykorzystują obwód zastępczy o stałych parametrach wyznaczanych przy niskim napięciu i temperaturze. W artykule potwierdzony został wpływ zarówno amplitudy napięcia wejściowego, jak i temperatury, na charakterystyki przejściowe PT. Aby uwzględnić stwierdzone zależności przy modelowaniu obwodowym PT, opracowana została metoda korekcji parametrów modelu PT uwzględniająca zmiany ich wartości w funkcji temperatury i napięcia wejściowego. Metoda ta pozwala uzyskać dużo lepszą zgodność wyników symulacji obwodowych z wynikami pomiarowymi w warunkach podwyższonych napięć i temperatur.

Słowa kluczowe: transformator piezoelektryczny, nieliniowość, modelowanie obwodowe, symulacja SPICE.

Circuit modeling of a piezoelectric transformer under elevated voltage and temperature conditions

Abstract

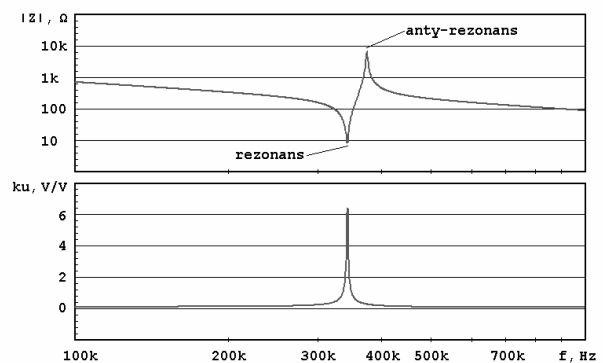
The paper refers to circuit modeling of piezoelectric transformers (PTs) operating under elevated voltage and temperature conditions. A PT is a resonant mechanical converter of electrical energy. Its characteristics (Fig. 1) are modeled by an equivalent circuit (Fig. 2) whose parameters are typically determined under low-voltage and low-temperature conditions and remain constant regardless of the model application. This approach is possibly erroneous due to the known temperature dependency and nonlinearities of piezoelectric materials. The temperature- and voltage-dependent variation of PT model parameters (Fig. 3) was determined by means of time domain measurements, which contrary to the widely used impedance analysis, allows high input voltages. A method for correction of the model parameters was established. Furthermore, the PT transfer characteristics were measured (Figs. 4 and 5) and compared to simulation results with and without the parameter correction (Fig. 6), showing considerable improvement in modeling accuracy with the new method applied.

Keywords: piezoelectric transformer, nonlinearity, circuit modeling, SPICE simulation.

1. Wstęp

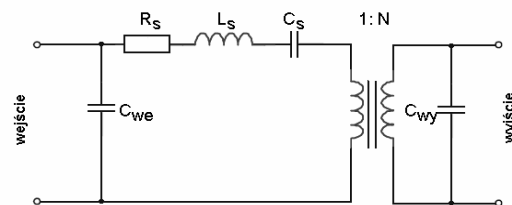
Transformatory piezoelektryczne (PT) przetwarzają energię elektryczną za pośrednictwem drgań mechanicznych. Ich liczne zalety w porównaniu z tradycyjnymi transformatorami elektromagnetycznymi sprawiają, że analiza i badania rozwojowe PT są obecnie ważnym tematem naukowym [18]. Autor koncepcji PT, C. A. Rosen, opatentował ją w 1961 roku [13], lecz parametry energetyczne ówczesnych materiałów piezoelektrycznych nie pozwalały na zbudowanie praktycznego urządzenia. PT wykonane ze współczesnych piezoelektryków jak np. „twardy” PZT (cyrko-

niano-tytanian ołowiu) typu Pz26 czy Pz28 [3] osiągają sprawności do 98%, przy pracy w warunkach rezonansu mechanicznego. Rezonans taki widoczny jest na charakterystykach częstotliwościowych PT jako lokalne minimum modułu impedancji wejściowej lub maksimum stosunku napięcia wyjściowego do wejściowego (wzmocnienia). Przy częstotliwości nieco wyższej od wspomnianego minimum modułu impedancji, zawsze występuje maksimum zwane anty-rezonansem. Charakterystyki modułu impedancji wejściowej oraz wzmocnienia napięciowego typowego PT dla częstotliwości z zakresu obejmującego pojedynczą parę rezonans – anty-rezonans przedstawia rysunek 1. Na rysunku 2 pokazany jest najczęściej stosowany tzw. jednogałęziowy model obwodowy PT, odwzorowujący charakterystyki z rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe PT – moduł impedancji wejściowej (górna) i wzmocnienie napięciowe (dolna)

Fig. 1. Example PT frequency characteristics – input impedance magnitude (top) and voltage gain (bottom)



Rys. 2. Jednogałęziowy model obwodowy PT

Fig. 2. Single-branch PT circuit model

Model jednogałęziowy jest poprawny jedynie w wąskim zakresie częstotliwości w pobliżu rezonansu roboczego, jednak stanowi on dobre przybliżenie, jeżeli inne rezonanse występujące na charakterystyce rozważanego PT są pomijalnie małe lub wystarczająco odległe od rezonansu głównego [6, 18]. Zwykle przyjmuje się, że parametry modelu (R_s , L_s , C_s , N , C_{wy}) są stałe i niezależne od czynników takich jak temperatura czy napięcie pracy PT. Ich wartości mogą być określone na podstawie stałych materiałowych i geometrycznych struktury PT [4, 6], jest to jednak metoda mało precyzyjna, wymagająca znajomości dokładnych parametrów materiału piezoelektrycznego oraz precyzyjnie podanych wymiarów struktury i jej poszczególnych warstw. Dlatego najczęściej korzysta się z opisanych m.in. w pracach [9, 12, 14] procedur wyznaczania parametrów modelu za pomocą pomiarów w dziedzinie częstotliwości z zastosowaniem analizy impedancyjnej.

W niniejszej pracy badany jest prototyp pierścieniowego PT firmy Noliac A/S [1, 2, 18], wykonany z materiału Pz26, o wielowarstwowej strukturze optymalizowanej do zastosowań obniżają-

cych napięcie. Jest to obecnie jedna z najbardziej zaawansowanych konstrukcji PT, o deklarowanej mocy znamionowej 40W.

2. Wpływ temperatury i napięcia wejściowego na parametry modelu obwodowego PT

Z uwagi na fakt, że nominalne moce PT osiągają poziom kilkudziesięciu watów, nawet przy pracy ze sprawnością przekraczającą 90%, wzrost temperatury spowodowany stratami mocy w niewielkiej objętościowo strukturze PT może być znaczny. Większość parametrów typowych materiałów piezoelektrycznych [3] jest silnie zależna od temperatury, można zatem spodziewać się odzwierciedlenia tych zależności także w charakterystykach elektrycznych PT. Wpływ temperatury na właściwości elementów piezoelektrycznych, w tym PT, był już wielokrotnie analizowany [5, 7, 8, 15, 16], zwykle jednak przyjmowano stałą jej wartość, podczas gdy w rzeczywistych warunkach pracy temperatura PT zależy od strat mocy i warunków chłodzenia. W pełni funkcjonalny sprzężony model elektrotermiczny PT pierścieniowego został zaproponowany przez autora w pracy [17], nie uwzględniał on jednak zaobserwowanych w późniejszym etapie badań zjawisk nieliniowych, o których będzie mowa dalej.

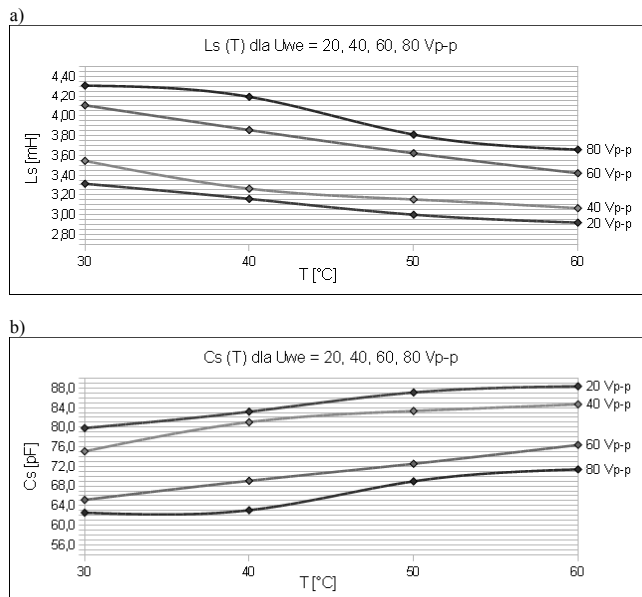
Analogicznie jak w przypadku innych znanych materiałów elektrotermicznych o strukturze domenowej, jak ferromagnetyki czy ferroelektryki, zachodzi podejrzenie, że materiały piezoelektryczne mogą wykazywać właściwości nieliniowe. Szczególnie interesująca jest wykazana w pracy [14] zależność częstotliwości rezonansowej od natężenia pola elektrycznego, na podstawie której można przypuszczać, że charakterystyki PT będą zależały od amplitudy napięcia wejściowego.

W rzeczywistych warunkach pracy PT panują napięcia wielokrotnie wyższe od stosowanych w typowych metodach identyfikacji parametrów jego modelu obwodowego. Również temperatura PT wzrasta zwykle od kilku do kilkudziesięciu °C względem temperatury otoczenia. W niniejszej pracy do wyznaczania parametrów R_S , L_S , C_S i N modelu została użyta metoda wykorzystująca pomiary w dziedzinie czasu [10, 11, 18] dająca możliwość łatwego uwzględnienia dowolnie wysokiej amplitudy napięcia sinusoidalnego na wejściu PT, co nie jest możliwe w przypadku zwykle stosowanej analizy impedancyjnej w dziedzinie częstotliwości. Parametry modelu zostały określone w zakresie napięć i temperatur odpowiadających typowym warunkom pracy PT w układzie przetwornicy. Zestawienie wartości parametrów wyznaczonych dla badanego PT pierścieniowego przedstawia tabela 1. Widoczny jest wyraźny wpływ zarówno amplitudy napięcia wejściowego, jak i temperatury na większość parametrów. Zależności temperaturowe parametrów L_S i C_S przedstawia rysunek 3.

Tab. 1. Parametry modelu badanego PT

Tab. 1. Model parameters of the investigated PT

T °C	$U_{we,p-p}$ V	R_S Ω	N	L_S mH	C_S pF
30	20	39,7	0,136	3,31	79,8
	40	45,5	0,133	3,55	75,1
	60	54,1	0,130	4,11	65,2
	80	61,5	0,129	4,31	62,6
40	20	40,0	0,138	3,16	83,2
	40	46,3	0,135	3,26	81,0
	60	57,1	0,122	3,86	69,1
	80	64,5	0,123	4,19	63,1
50	20	41,7	0,137	3,00	87,1
	40	46,7	0,131	3,15	83,3
	60	56,6	0,124	3,62	72,6
	80	63,0	0,126	3,81	69,0
60	20	33,6	0,142	2,92	88,4
	40	47,2	0,131	3,07	84,7
	60	56,1	0,127	3,42	76,4
	80	62,0	0,124	3,66	71,4

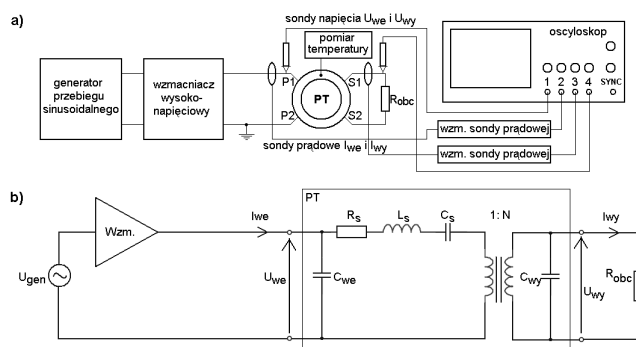


Rys. 3. Charakterystyki zmienności parametrów $L_S(a)$ i $C_S(b)$ modelu PT w funkcji temperatury dla napięcia wejściowego 20 Vp-p, 40 Vp-p, 60 Vp-p i 80 Vp-p

Fig. 3. Temperature characteristics of $L_S(a)$ and $C_S(b)$ model parameters for input voltages: 20 Vp-p, 40 Vp-p, 60 Vp-p i 80 Vp-p

3. Pomiary charakterystyk przejściowych PT

Charakterystyki przejściowe są podstawowymi charakterystykami eksploatacyjnymi transformatora piezoelektrycznego. Ich wyznaczenie w rzeczywistych warunkach pracy PT jest interesujące i dotychczas nie było opisane w literaturze. Celem wyznaczenia charakterystyk przejściowych badanego PT przeprowadzono serię pomiarów dla różnych wartości rezystancji obciążenia R_{OBC} i amplitud napięcia wejściowego U_{we} . Napięcie wejściowe i obciążenie są to typowe parametry, których zmiany występują w rzeczywistych warunkach pracy PT. Mają one wpływ na przetwarzaną przez PT moc oraz na jego temperaturę w określonych warunkach chłodzenia. Pomiary przeprowadzono w układzie z rysunku 4.

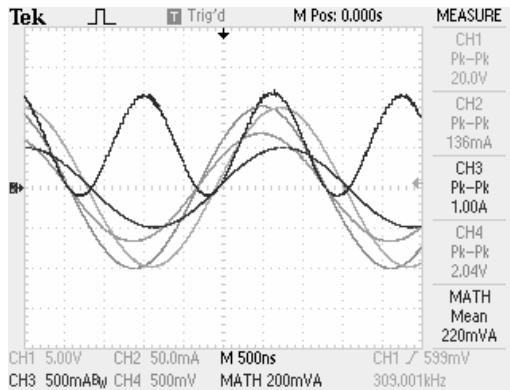


Rys. 4. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk przejściowych PT – schemat funkcjonalny (a) oraz uproszczony schemat elektryczny (b)

Fig. 4. Experimental set-up for the measurement of PT transfer characteristics – functional diagram (a) and simplified circuit diagram (b)

Przebiegi U_{we} i U_{wy} były obserwowane oscyloskopowo z użyciem standardowych sond napięciowych 10x, przebiegi I_{we} i I_{wy} – za pomocą pary identycznych sond prądowych o współczynniku 1V/1A. Dodatkowo oscyloskop obliczał i wyświetlał przebieg iloczynny chwilowych wartości U_{we} i I_{we} lub U_{wy} i I_{wy} . Wartość średnia za okres tego przebiegu, wyznaczona również przez oscyloskop za pomocą funkcji pomiaru automatycznego, równa była odpowiednio mocy czynnej wejściowej P_{we} i mocy czynnej wyj-

ściowej P_{wy} . Przykładowe przebiegi obserwowanych wielkości wraz z odczytami ich wartości przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi napięcia (CH1, 5 V/dz) i prądu wejściowego (CH2, 50 mA/dz), napięcia (CH4, 500 mV/dz) i prądu wyjściowego (CH3, 500 mA/dz) oraz mocy wejściowej (MATH, 200 mVA/dz) obserwowane przy wyznaczaniu charakterystyk przejściowych PT (podstawa czasu 500 ns/dz)

Fig. 5. Example waveforms of input voltage (CH1, 5 V/div) and current (CH2, 50 mA/div), output voltage (CH4, 500 mV/div) and current (CH3, 500 mA/div) and input power (MATH, 200 mVA/div) acquired in progress of PT transfer characteristics measurement (time base 500 ns/div)

Częstotliwość napięcia U_{gen} była za każdym razem dostrajana do rezonansu szeregowej gałęzi $R_S-L_S-C_S$ poprzez obserwację maksimum I_{wy} . Amplituda U_{gen} ustawiana była następnie tak, by otrzymać U_{we} o żądanej wartości (10 V, 20 V itd.). Zarówno częstotliwość, jak i amplituda U_{gen} były korygowane po ustaleniu się temperatury PT. Pomiary przeprowadzono w trzech seriach, odpowiednio dla trzech wartości rezystancji obciążenia R_{OBC} : 1 Ω , 2 Ω i 4 Ω . W każdej serii wykonano cztery pomiary, dla ustalonej zewnętrznie amplitudy napięcia wejściowego U_{we} równej 10, 20, 30 i 40 V (20, 40, 60 i 80 V_{p-p}). Wartości temperatur ustalały się w sposób naturalny, poprzez samoistne nagrzewanie się transformatora wskutek wydzielania się mocy strat zależnej od zadanych warunków pracy. Ustalanie się temperatury pracy PT odbywało się w identycznych dla wszystkich pomiarów warunkach wymiany ciepła z otoczeniem poprzez swobodną konwekcję. Wyniki pomiarów i obliczeń do wyznaczenia charakterystyk przejściowych PT przedstawia tabela 2. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów analizowane były następnie charakterystyki napięcia wyjściowego, mocy wyjściowej i sprawności w funkcji napięcia wejściowego.

Tab. 2. Zmierzone charakterystyki przejściowe badanego PT

Tab. 2. Measured transfer characteristics of the investigated PT

R_{OBC} Ω	U_{WE-p-p} V	U_{WY-p-p} V	f_{REZ} kHz	T $^{\circ}C$	P_{WE} W	P_{WY} W	k_u V/V	η %
1	20	1,47	310,1	30,5	0,469	0,275	0,074	58,6
	40	2,90	311,8	45,5	1,89	1,07	0,073	56,6
	60	4,24	314,1	70,5	4,11	2,27	0,071	55,2
	80	4,92	315,7	110	6,10	2,92	0,062	47,9
2	20	1,82	308,0	27,8	0,314	0,217	0,091	69,1
	40	3,64	309,1	33,0	1,26	0,857	0,091	68,0
	60	5,44	310,6	42,0	2,82	1,93	0,091	68,4
	80	7,36	313,2	55,3	5,08	3,60	0,092	70,9
4	20	2,14	310,1	27,4	0,198	0,162	0,107	81,8
	40	4,24	311,1	29,8	0,795	0,609	0,106	76,6
	60	6,36	312,2	34,5	1,76	1,36	0,106	77,3
	80	8,24	312,8	40,6	3,07	2,27	0,103	73,9

4. Symulacje charakterystyk przejściowych

Symulacyjne wyznaczenie charakterystyk przejściowych przeprowadzono w obwodzie jak na rysunku 4 w środowisku SPICE. Wartości parametrów C_{we} i C_{wy} przyjęto jako stałe i równe wynikom pomiarów pojemności mostkiem RLC odpowiednio na zaciskach wejściowych i wyjściowych. Częstotliwość probierza mostka wynosi 1 kHz, co stanowi wartość na tyle niską, że impedancje wejściowa i wyjściowa PT wynikają praktycznie wyłącznie ze wspomnianych pojemności. Zmierzone wartości to $C_{we} = 1,25$ nF, $C_{wy} = 40$ nF.

W pierwszej serii symulacji zastosowano model ze skorygowanymi parametrami R_S , L_S , C_S i N . Dla każdej branej pod uwagę wartości amplitudy napięcia wejściowego i odpowiadającej jej przy danym obciążeniu temperatury (tabela 2), wartości tych parametrów były dobierane na podstawie interpolacji lub ekstrapolacji danych z tabeli 1. W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację w dziedzinie częstotliwości, (AC), na podstawie której znajdowano częstotliwość rezonansową dla danego zestawu parametrów R_S , L_S , C_S , N i R_{OBC} . Następnie przeprowadzono symulację w dziedzinie czasu (TRAN), w której źródło napięcia wejściowego ustawiano na sygnał sinusoidalny o zadanej amplitudzie i częstotliwości uzyskanej z symulacji AC. Po osiągnięciu przez przebiegi prądów i napięć na wejściu i wyjściu PT stanu ustalonego, odczytywano amplitudę napięcia wyjściowego oraz wartości mocy czynnych jako wartości średnie przebiegów chwilowej mocy wejściowej i wyjściowej. Z otrzymanych wartości obliczano wzmocnienie napięciowe k_u oraz sprawność η . Wyniki przedstawia tabela 3.

Tab. 3. Symulowane charakterystyki przejściowe badanego PT
Tab. 3. Simulated transfer characteristics of the investigated PT

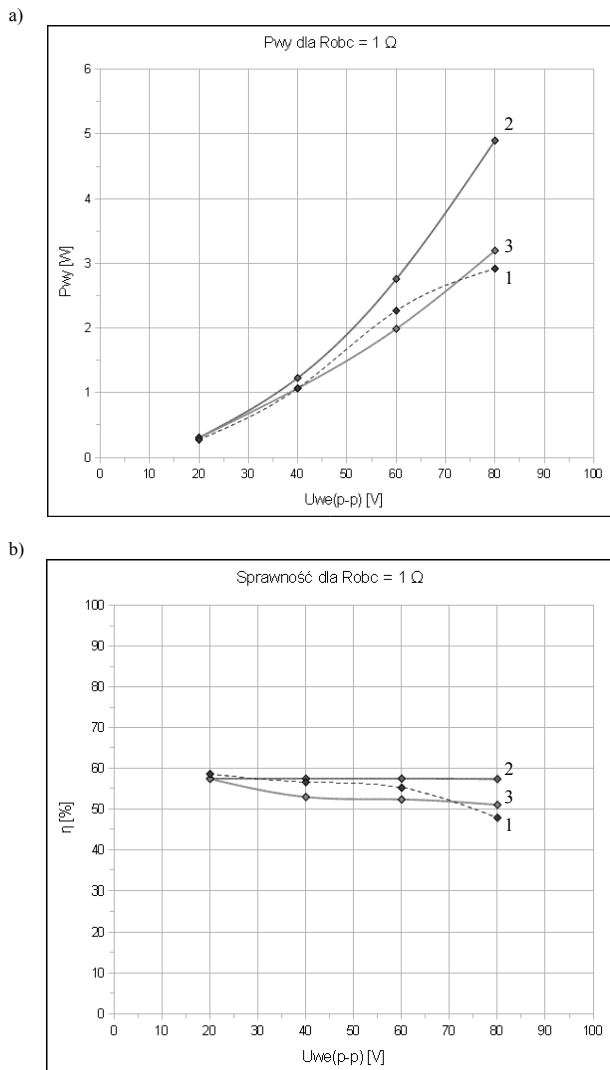
R_{OBC} Ω	U_{WE-p-p} V	T $^{\circ}C$	f_{REZ} kHz	U_{WY-p-p} V	P_{WE} W	P_{WY} W	k_u V/V	η %
1	20	30,5	309,4	1,57	0,533	0,306	0,079	57,4
	40	45,5	310,2	2,92	2,02	1,07	0,073	53,0
	60	70,5	312,0	4,00	3,80	1,99	0,067	52,4
	80	110	313,2	5,08	6,27	3,20	0,064	51,0
2	20	27,8	309,6	2,00	0,343	0,249	0,100	72,6
	40	33,0	309,0	3,82	1,30	0,913	0,096	70,2
	60	42,0	309,0	5,16	2,39	1,67	0,086	69,9
	80	55,3	311,6	6,77	4,34	2,88	0,085	66,4
4	20	27,4	310,7	2,37	0,211	0,176	0,119	83,4
	40	29,8	309,9	4,54	0,785	0,645	0,114	82,2
	60	34,5	309,1	6,34	1,56	1,26	0,106	80,8
	80	40,6	311,1	8,13	2,61	2,06	0,102	78,9

Drugą serię symulacji przeprowadzono z zastosowaniem modelu o parametrach nieskorygowanych. Niezależnie od amplitudy napięcia wejściowego i odpowiadającej jej przy danym obciążeniu temperatury, wartości parametrów były ustalone dla $U_{we} = 20$ V_{p-p} i $T = 30$ $^{\circ}C$ (tabela 1).

5. Porównanie wyników pomiarów i symulacji

Przykładowe porównanie charakterystyk przejściowych dla $R_{OBC} = 1$ Ω otrzymanych z pomiarów oraz w wyniku symulacji z użyciem modelu skorygowanego i nieskorygowanego przedstawia rysunek 6.

Analiza porównawcza charakterystyk przejściowych $U_{wy}(U_{we})$, $P_{wy}(U_{we})$ i $\eta(U_{we})$ pozwala stwierdzić dużą rozbieżność wyników pomiarowych i wyników symulacji z użyciem modelu o parametrach nieskorygowanych.



Rys. 6. Charakterystyki przejściowe mocy (a) i sprawności (b) badanego PT dla $R_{OBC} = 1 \Omega$: 1 – pomiar, 2 – symulacja bez korekcji parametrów modelu, 3 – symulacja z użyciem modelu o parametrach skorygowanych

Fig. 6. PT transfer characteristics: output power (a) and efficiency (b) as functions of the input voltage – comparison of measurement (1) and simulation (2 – uncorrected, 3 – corrected model parameters) results

Model o parametrach korygowanych, dzięki uwzględnieniu zmian ich wartości wynikających ze wzrostu tak napięcia wejściowego, jak i temperatury, odwzorowuje analizowane charakterystyki przejściowe PT dużo lepiej od modelu o parametrach niekorygowanych. Stwierdzenie to jest słuszne również dla pozostałych wziętych pod uwagę wartości R_{OBC} : 2 Ω i 4 Ω [18].

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzona została zależność większości parametrów modelu obwodowego PT od napięcia wejściowego oraz temperatury. Analiza charakterystyk przejściowych PT zmierzonych w warunkach podwyższonych napięć i temperatur wskazuje na niższe wartości napięcia wyjściowego, mocy wyjściowej i sprawności, w porównaniu z wynikami symulacji z użyciem typowego modelu obwodowego bez korekcji parametrów. Jest to zgodne z oczekiwaniami i charakterystyczne dla odstrajania się PT od rezonansu, w którym znajdował się w warunkach niskiego napięcia i temperatury. Uwzględnienie wpływu wzrostu napięcia wejściowego i związanego z nim wzrostu temperatury na parametry modelu jest możliwe pod warunkiem zastosowania metody wyznaczania tych parametrów pozwalającej na ich określenie w warunkach podwyższonego napięcia wejściowego. Taką metodą jest metoda wykorzystująca pomiary w dziedzinie czasu, której tutaj użyto. Wyznaczone dzied-

ki niej charakterystyki zmienności parametrów modelu PT pozwoliły na uzyskanie symulowanych charakterystyk przejściowych o dużo lepszej zgodności z wynikami pomiarowymi, niż w przypadku symulacji z użyciem modelu o stałych, niekorygowanych parametrach.

7. Literatura

- [1] Bove T., Wolny W., Ringgaard E., Brebol K.: New Type of Piezoelectric Transformer With Very High Power Density, 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp. 321-324, 2000.
- [2] Brebol K.: Piezoelectric Transformer, U.S. Patent 6,707,235, 2004.
- [3] Ferroperm Piezoceramics, High quality components and materials for the electronic industry, www.ferroperm-piezo.com
- [4] Fung S.W., Pong M.H.: An Improved Model for Rosen Type Piezoelectric Transformer for power converter, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [5] Joo H.W. et al.: Analysis of Temperature Rise for Piezoelectric Transformer Using Finite-Element Method, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.53, No.8, August 2006.
- [6] Lin Ch.: Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converters - PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [7] Lin Ch.H. et al.: Eliminating the Temperature Effect of Piezoelectric Transformer in Backlight Electronic Ballast by Applying the Digital Phase-Locked-Loop Technique, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.54, No.2, April 2007.
- [8] Loyau V. et al.: Analyses of the Heat Dissipated by Losses in a Piezoelectric Transformer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.56, No.8, August 2009.
- [9] Oliver J.A. et al.: 1D Modeling of Multi-layer piezoelectric transformers, IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol. 4, pp. 2097-2102, June, 2001.
- [10] Ozeri S., Shmilovitz D.: Piezoelectric Transformers Model Parameters Extraction based on Time domain Measurements, 21st Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1565-1569, March, 2006.
- [11] Ozeri S., Shmilovitz D.: A Time Domain Measurements of Piezoelectric Transformers Equivalent Circuit Parameters, IEEE International Conference on Circuits and Systems, pp. 2281-2284, May 2006.
- [12] Priya S. et al.: High Power Universal Piezoelectric Transformer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.53, No.4, April 2006.
- [13] Rosen C.A.: US Patent 2,974,296, 1961.
- [14] Szalewski M.: Pomiar strat elektrycznych i mechanicznych w ceramice piezoelektrycznej z zastosowaniem transformatora piezoelektrycznego, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2005.
- [15] Tomalczuk K., Chalczyński M., Więcek B.: Thermomechanical analysis of piezoelectric transformers, 14th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry THERMO 2005, Budapeszt, Węgry, 22-24 czerwca 2005, 2005.
- [16] Tomalczuk K., Więcek B.: Thermal analysis and thermographic measurements of piezoelectric transformers, 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT 2006, Padova, Włochy, Materiały konferencyjne CD 28-30 czerwca 2006, 2006.
- [17] Tomalczuk K., Więcek B.: Modelowanie transformatora piezoelektrycznego z uwzględnieniem samonagrzewania, Pomiary Automatyka Kontrola, Miesięcznik Naukowo-Techniczny, nr 11/2009, 2009, str. 973-976.
- [18] Tomalczuk K.: Analiza i badania transformatora piezoelektrycznego w warunkach samonagrzewania, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2011.