



Teresa BUCHACZ

Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki Energopomiar-Elektryka Gliwice

## Wykorzystanie analiz chromatograficznych (DGA) w badaniach odbiorczych i pomodernizacyjnych transformatorów olejowych

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę nowoczesnej diagnostyki nowo produkowanych i modernizowanych transformatorów opartą o analizę chromatograficzną gazów rozpuszczonych w oleju. Omówiono wymagania odnośnie aparatury i kryteria oceny wyników. Zaprezentowano ciekawsze rezultaty i ich korelacje z wykrytymi usterkami. Poświęcono też uwagę zagadnieniom badań jednostek rozdzielczych. Podano przykłady DGA przeprowadzanych podczas prób konstruktorskich i modernizacyjnych. Zestawiono wnioski i literaturę.

**Abstract:** (*Application of chromatographic analyses (DGA) to acceptance and postmodernization tests of oil insulated transformers.*) In the paper there is presented a method of modern diagnosis of newly manufactured and modernized transformers based on the chromatographic analysis of gases dissolved in the oil. Requirements connected with equipment and criteria of evaluating results are discussed. More interesting results and their correlations with detected faults are presented. Attention is also paid to tests of distribution transformers. Examples of DGA during designing and modernization tests are given. Bibliography and conclusions are summarized.

**Słowa kluczowe:** olej transformatorowy, próby fabryczne, DGA, uszkodzenie.

**Keywords:** transformer oil, factory tests, DGA, fault.

### Wstęp

Analiza chromatograficzna gazów rozpuszczonych w oleju (DGA) jest najbardziej uznaną i skuteczną metodą oceny stanu technicznego transformatorów [1]. Umożliwia ona wykrywanie wolno rozwijających się uszkodzeń wewnętrznych, głównie o charakterze wyładowań o różnej gęstości energii i przegrzań, stwarzając jednocześnie szansę podjęcia w porę środków zaradczych i uniknięcia kosztownych wyłączeń lub awarii [2].

Do niedawna jeszcze stosowano ją prawie wyłącznie do badania jednostek w eksploatacji, ale ciągle rozwój techniki analitycznej, pozwalający na oznaczanie bardzo niskich koncentracji gazów i śledzenie nawet niewielkich ich zmian stworzył możliwość wykonywania tych badań również na etapie produkcji transformatorów. Pierwsze takie doświadczenia podejmowane były za granicą już w latach 80-tych i dotyczyły głównie prób nagrzewania transformatorów mocy. Zaowocowały one opracowaniem przez Komitet Studiów 12 CIGRE odpowiednich wymagań dotyczących aparatury i kryteriów oceny wyników [3], które zostały częściowo wprowadzone również do treści norm IEC [4,5]. Pojawiły się też inne wymagania, głównie amerykańskie, uwzględniające specyfikę tamtejszych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. Obecnie badania DGA podczas prób fabrycznych wykonywane są przez większość liczących się na świecie producentów transformatorów.

### Wymagania dotyczące aparatury stosowanej w badaniach DGA

W oleju transformatorów na etapie produkcji występują bardzo małe zawartości gazów. Z tego względu wiarygodność uzyskiwanych rezultatów jest ściśle związana z poprawnością pobierania próbek i techniką prowadzenia analiz. Aparatura stosowana do wydzielania gazu i oznaczania jego składników powinna spełniać ostrzejsze wymagania niż te dla oleju pobranego z pracujących już transformatorów i zapewniać wysoką wykrywalność wynoszącą dla: wodoru 2 ppm, węglowodorów 0,1 ppm, tlenu i dwutlenku węgla odpowiednio 5 i 10 ppm, tlenu i azotu 50 ppm. Stąd też nie każdy ośrodek wykonujący badania eksploatacyjne może podjąć się również

prowadzenia analiz chromatograficznych u producenta podczas prób fabrycznych nowych transformatorów.

Instytucją, która wprowadziła ponad trzydzieści lat temu badania chromatograficzne w krajowej energetyce i nadal stosuje je dla coraz większej liczby produkowanych transformatorów jest Energopomiar-Elektryka. Analizy DGA przeprowadza się tu dwiema metodami, przy zastosowaniu odpowiednich zestawów chromatograficznych, różniących się sposobem wydzielenia gazu z próbki oleju. Obie metody zapewniają oznaczenie: wodoru, metanu, etanu, etylenu, acetyleny, propanu, propylenu, n-butanu, tlenu i dwutlenku węgla oraz gazów atmosferycznych, spełniając jednocześnie wymagania dotyczące ich wykrywalności.

W metodzie próżniowej badanie wykonuje się zgodnie z [5] i [6] met. A, wykorzystując zestaw chromatograficzny angielskiej firmy Pye-Unicam, składający się z urządzenia do ekstrakcji gazów z oleju w wysokiej próżni połączonego w jeden system z automatycznym chromatografem analizującym gaz, którego pracą steruje komputer.

Z kolei, gdy istnieje konieczność wykonania badań próbki oleju o małej objętości (15 ml), wykorzystuje się metodę odgazowania techniką *head-space* wg [6] met. C. W tym przypadku stosowana jest najnowocześniejsza, całkowicie zautomatyzowana aparatura składająca się z urządzenia do wydzielania w temperaturze 70 °C lotnych frakcji z oleju, które występują w równowadze termodynamicznej w układzie zamkniętym, a następnie ich analizie na chromatografie gazowym firmy Agilent.

W obu metodach jako wzorzec stosuje się certyfikowany gaz belgijskiej firmy PRAXAIR. Wyniki całkowitej zawartości gazu oraz koncentracji składników podaje się w  $\mu\text{l/l}$  [ppm] objętości gazu w stosunku do objętości oleju po przeliczeniu na ciśnienie 101,3 kPa i temperaturę 20°C.

### Przydatność DGA podczas prób fabrycznych transformatorów i kryteria oceny wyników

Analizy DGA wykonywane na etapie produkcji nowych transformatorów wykazują dużą przydatność do wykrywania wad i defektów, które w eksploatacji prowadziłyby nieuchronnie do powstania uszkodzeń wewnętrznych. Badania te prowadzi się głównie podczas próby nagrzewania, gdyż pozwalają na wykrycie ewentualnych uszkodzeń o charakterze miejscowych przegrzań

wewnętrznych. Jak wynika z doświadczeń Energopomiaru,

z powodzeniem można je wykonywać również podczas prób napięciowych, a także innych o dłuższym czasie trwania np. stanu jałowego, gdyż pozwalają, jak się okazało na uzyskanie dodatkowych informacji wyjaśniających często przyczynę negatywnego wyniku tych prób.

Do oceny rezultatów DGA stosowane są kryteria przyjęte zgodnie z zaleceniami Komitetu Studiów CIGRE 12. Dotyczą one zarówno dopuszczalnych koncentracji poszczególnych składników gazowych w oleju, którym napełniono transformator jeszcze przed rozpoczęciem prób, jak i akceptowalnych przyrostów gazów podczas próby nagrzewania, ujętych w dwóch zakresach.

**Doświadczenia krajowe w dziedzinie badań DGA podczas prób fabrycznych:**

**transformatorów dużej mocy**

Doceniając korzyści płynące z uzyskiwanych podczas badań chromatograficznych informacji producent transformatorów Elta Łódź, a obecnie ABB sp. z o.o. jako pierwsza w Polsce fabryka wprowadziła DGA już kilkanaście lat temu do rutynowych badań praktycznie wszystkich produkowanych przez siebie jednostek dużych i średnich napięć. Podobnie postąpili inni krajowi producenci. Od tego czasu zebrano wiele doświadczeń, a stosunkowo łatwa możliwość konfrontowania uzyskanych rezultatów analiz z wynikami dokonywanych oględzin jeszcze u producenta pozwala na stawianie coraz bardziej precyzyjnych diagnoz i usuwanie ewentualnych usterek na miejscu w fabryce. Ma to przede wszystkim aspekt ekonomiczny, gdyż prowadzi do zmniejszenia kosztów związanych z naprawami gwarancyjnymi i stwarza możliwość zakupu transformatorów charakteryzujących się większą niezawodnością eksploatacyjną. Nie bez znaczenia jest również utrzymywanie dobrego wizerunku i prestiżu firmy poprzez stałą kontrolę wyrobów jeszcze u producenta, szczególnie w czasach silnej konkurencji na rynku energetycznym.

Typowe wyniki DGA uzyskiwane podczas prób fabrycznych nowych jednostek dużej mocy przedstawiono na przykładzie transformatora 160 MVA.

W tabeli 1a zestawiono zarówno wartości dopuszczalnych koncentracji rozpuszczonych gazów w oleju jeszcze przed przeprowadzeniem prób fabrycznych transformatora, jak i rezultaty badań chromatograficznych wykonanych podczas standardowej próby nagrzewania, trwającej 12 godzin. Badana jednostka przeszła tę próbę z wynikiem pozytywnym, bez jakichkolwiek symptomów uszkodzeń wewnętrznych, o czym świadczą niewielkie przyrosty gazów podczas jej trwania, mieszczące się w pierwszym zakresie obowiązujących kryteriów (tabela 1b). Pozwoliło to na przekazanie transformatora klientowi bez zastrzeżeń.

Tabela 1a. Wyniki badań DGA nowego transformatora 160 MVA

Skład i koncentracja gazu		Wartości dopuszczalne przed próbami wg [3] [ppm]	Wartości zmierzone [ppm]		
			po napełnieniu transformatora	przed próbą nagrzewania	po próbie nagrzewania
Metan	CH <sub>4</sub>	2,5	0,2	0,3	0,5
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2	ślad <sup>*)</sup>	0,1	0,2
Etylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,1	0,2	0,2
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	brak	brak	brak
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	–	brak	brak	brak
Propylen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	–	brak	brak	ślad <sup>*)</sup>
n-Butan	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	–	brak	brak	brak
Wodór	H <sub>2</sub>	15	1	2	6
Tlenek węgla	CO	80	3	4	6
Dwutlenek węgla	CO <sub>2</sub>	200	12	18	32

<sup>\*)</sup> - oznacza składniki gazu wykrywane jeszcze, ale o stężeniach szacowanych poniżej 0,01 ppm

Tabela 1b. Kryteria oceny próby nagrzewania transformatora 160 MVA

Kryterium oceny		Wartości dopuszczalne		Wartość obliczone
		Zakres 1	Zakres 2	
Przyrost C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> podczas próby [ppm]		Niższy od max. rozrzutu wyników S <sub>d</sub> (X) (0,20ppm) <sup>*)</sup>		0
Przyrost na godzinę	H <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [ppm/h]	<2	<5	0,36
	CO [ppm/h]	<5	<25	0,2
	CO <sub>2</sub> [ppm/h]	<20	<100	1,2
		Brak symptomów uszkodzenia oraz jakichkolwiek zastrzeżeń	Transformator należy poddawać częstszym badaniom w eksploatacji	

<sup>\*)</sup> S<sub>d</sub>(X) = 0,1 (X<sub>1</sub>) + 2 S<sub>d</sub> (X) gdzie (X<sub>1</sub>) - oznaczona ilość danego składnika gazu przed próbą; S<sub>d</sub>(X) - najmniejsza wykrywalna podczas analizy wartość składnika gazu (X) (dla węglowodorów wynosi 0,1 ppm

Dotychczasowe doświadczenia zdobyte na przestrzeni kilkunastu lat wykazały w nowo produkowanych transformatorach różnych typów, w których nie wykryto usterek, znacznie niższe od wymaganych poziomy przyrostów gazów. Dotyczy to szczególnie dwutlenku węgla, którego kryterium przyrostu, jak się ocenia jest zbyt łagodne. Pogląd ten podzielają również inne ośrodki badawcze, na co zwrócono uwagę w publikacji [7] i co powinno naszym zdaniem być zweryfikowane.

Kolejny przykład dotyczy nowego autotransformatora o mocy 75 MVA, w którym podczas próby napięciem indukowanym pojawiły się nadmierne, niespotykane w nowych jednostkach ilości gazów palnych, zwłaszcza wodoru i acetyleny (tabela 2), które są typowymi produktami rozkładu oleju, powstającymi podczas wyładowań elektrycznych zupełnych. W próbce pobranej 40 minut od zakończenia próby ilość tych gazów znacząco jeszcze wzrosła.

Po wyjęciu części aktywnej stwierdzono przebicie od odpływu do kadzi, spowodowane błędem wykonawczym. Jak się okazało, jeden z odpływów regulacyjnych był zbliżony do kadzi, a izolacja przewodu nie mogła w tym przypadku zapewnić odpowiedniej wytrzymałości na przebicie. Usterkę naprawiono, a olej poddano próżniowej obróbce w celu usunięcia gazowych produktów rozkładu. Ponowne próby fabryczne zostały wykonane z wynikiem pozytywnym.

Tabela 2. Wyniki badań DGA autotransformatora 75 MVA podczas próby napięciem indukowanym

Skład i koncentracja gazu	Wartości dopuszczalne przed próbami wg [3]	Wartości zmierzone [ppm]		
		przed próbami	po próbie napięciem indukowanym	po próbie napięciem indukowanym (po 40 min.)
metan CH <sub>4</sub>	2,5	0,2	1,3	7,1
etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2	brak	0,1	0,5
etylen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,1	2,1	8,8
acetylen C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	brak	8,1	25,2
propan C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	–	brak	brak	0,1
propylen C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	–	brak	0,6	0,8
n-butan n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	–	brak	1,2	1,5
wodór H <sub>2</sub>	15	brak	8	54
tlenek węgla CO	80	4	5	5
dwutlenek węgla CO <sub>2</sub>	200	46	48	56

Pomimo, że w dokumentach IEC stwierdza się, że wykonywanie DGA podczas prób fabrycznych o krótkim czasie trwania nie ma istotnego znaczenia diagnostycznego [3,4], doświadczenia naszego laboratorium wskazują, że wyniki takich badań również są przydatne i mogą sygnalizować obecność uszkodzeń. Jednym z przykładów jest identyczna jednostka, w której po przeprowadzonej próbie napięciem udarowym wyniki badań DGA wskazywały na wyładowanie zupełne z udziałem izolacji papierowej (co sugeruje znacznie wyższa niż w poprzednim przypadku ilość tlenków węgla i wysoka wartość stosunku CO/CO<sub>2</sub>) (tabela 3). Aby wydzielone tylko lokalnie gazy mogły rozpuścić się w całej objętości oleju próbkę do badań pobrano dopiero po trzech godzinach od zakończenia próby.

Tabela 3. Wyniki badań DGA autotransformatora 75 MVA podczas próby napięciem udarowym

Skład i koncentracja gazu	Wartości dopuszczalne przed próbami wg [3]	Wartości zmierzone [ppm]	
		przed próbami	po próbie napięciem piorunowym impulsowym (po 3 h)
metan CH <sub>4</sub>	2,5	0,1	1,5
etan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2	brak	0,1
etylen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	brak	1,1
acetylen C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	brak	1,3
propan C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	–	brak	brak
propylen C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	–	brak	0,6
n-butan n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	–	brak	1,2
wodór H <sub>2</sub>	15	brak	10
tlenek węgla CO	80	3	137
dwutlenek węgla CO <sub>2</sub>	200	56	208

Po wyjęciu części aktywnej autotransformatora z kadzi stwierdzono ślady wyładowań pomiędzy drugą a trzecią warstwą uzwojenia DN fazy B, co obrazuje fotografia oraz pomiędzy pierścieniem ekranującym górnej części uzwojenia GN fazy C, a siódmym zwojem (licząc od góry) DN tej samej fazy. Przyczyną osłabienia tych miejsc była uszkodzona izolacja.



Fot. 1. Ślady wyładowań między uzwojeniami DN autotransformatora 75 MVA

### transformatorów remontowanych

Laboratorium Energopomiaru wykonuje również badania chromatograficzne podczas prób jednostek poddawanych remontom zwykłym i modernizacyjnym. Okazuje się, że choć poziomy gazów przed próbami są na ogół wyższe od zazwyczaj spotykanych w nowych transformatorach, ze względu na uwalnianie się gazów zaabsorbowanych na pozostawionych materiałach konstrukcyjnych oraz izolacji papierowej, to wielkości przyrostów poszczególnych składników gazowych podczas trwania prób po uwzględnieniu tego zjawiska niewiele się różnią od towarzyszących badaniom jednostek nowo produkowanych. Dlatego analizy chromatograficzne, jak wykazują nasze doświadczenia, mogą być z równie dobrym skutkiem wykorzystywane do oceny poprawności wykonywanych prac remontowych w naprawianych i modernizowanych transformatorach.

### transformatorów rozdzielczych

Według wspomnianych dokumentów zagranicznych [3,4] badanie DGA podczas prób fabrycznych powinno przeprowadzać się przede wszystkim dla transformatorów o mocy 75 MVA i wyższej.

Dla jednostek mniejszych brak jest w tym zakresie jakichkolwiek wskazówek lub zaleceń. Laboratorium Energopomiaru wychodząc naprzeciw potrzebom producenta transformatorów rozdzielczych wprowadziło te badania również dla jednostek o mocy 63÷1600 kVA [8].

Od kilku już lat wykonuje się z powodzeniem analizy chromatograficzne podczas prób typu oraz badań specjalnych jednostek prototypowych.

W kilku przypadkach umożliwiło to zlokalizowanie i wykrycie anomalii oraz słabych punktów konstrukcji transformatorów po kompletnym demontażu części wyjmowanej, które były źródłem generacji nadmiernych ilości gazów na skutek wyładowań elektrycznych zupełnych i niezupełnych oraz lokalnych przegrzań. Przykłady uzyskanych rezultatów DGA dwóch prototypowych jednostek: 250kVA i 100 kVA, po przejściu z negatywnym wynikiem prób napięciowych zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki badań DGA transformatorów prototypowych z wykrytymi uszkodzeniami

Pochodzenie próbek	Skład i koncentracja rozpuszczonych w oleju gazów [ppm]										Uwagi
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
Transformator prototypowy 250 kVA po próbach napięciem udarowym	15,6	1,1	12,4	56,8	0,1	2,1	brak	135	20	92	Wyładowanie zupełne o średniej gęstości energii. Podczas rewizji stwierdzono przebicie izolacji uzwojenia DN.
Transformator prototypowy 100 kVA po próbach napięciowych i pomiarze wyładowań niezupełnych	0,8	0,1	0,2	0,1	brak	0,1	brak	160	19	68	Badania prowadzone w ramach prób typu wykazały wysoki poziom wyładowań niezupełnych, co znalazło potwierdzenie w wynikach DGA. Przegład wewnętrzny ujawnił źródło wyładowań.

### Inne zastosowania DGA dla potrzeb producentów transformatorów

Jak się okazuje, nie zawsze źródłem powstawania gazów musi być rozkład izolacji transformatora spowodowany obecnością uszkodzeń wewnętrznych.

Nadmierne ilości gazów w oleju transformatorów mogą tworzyć się w przypadkach np. niewłaściwe dobranych materiałów konstrukcyjnych i powłok malarskich, na co wskazują badania modelowe prowadzone w różnych ośrodkach na świecie, w tym także w Niemczech [7].

Również w laboratorium Energopomiaru przeprowadza się prace badawcze, mające na celu określenie wpływu na właściwości oleju nowych, nie stosowanych jeszcze podczas produkcji transformatorów tworzyw: gum, preszpanów lakierów, żywic itp., które podczas specjalnych prób starzeniowych kontaktuje się z olejem izolacyjnym, dobierając takie proporcje, jak w rzeczywistym transformatorze. Akceptacja i dopuszczenie do stosowania testowanych, nowych materiałów konstrukcyjnych odbywa się po pozytywnej ocenie wyników, w tym przede wszystkim chromatograficznych i braku negatywnego wpływu tych tworzyw na inne ważne parametry oleju izolacyjnego.

Gazy w oleju nowych transformatorów mogą pochodzić również z niewłaściwie przygotowanego osprzętu.

Przykładem tego było kilka wyprodukowanych w różnym czasie transformatorów o mocy (10÷25) MVA, które przeszły próby fabryczne połączone z badaniem DGA z wynikiem pozytywnym. Podczas prac pomontażowych tych jednostek rutynowe badanie oleju, które zgodnie z przepisami [1] wykonuje się przed włączeniem transformatora do eksploatacji niespodziewanie wykazało obecność nadmiernej ilości gazów palnych, w tym głównie wodoru. Jak wykazały podjęte dla wyjaśnienia tej anomalii prace, przyczyną tego było wymywanie z wewnętrznych powierzchni elementów wyposażenia transformatorów (głównie: radiatorów, chłodnic i orurowania), gazów tworzących się w procesie technologicznym podczas grzewania i spawania. Zdobyte doświadczenia pozwoliły podjąć producentowi osprzętu skuteczne działania polegające na dokładnym płukaniu olejem wyprodukowanych części tak, aby wyeliminować przyczynę pojawiania się gazów w oleju nowych, nie pracujących jeszcze transformatorów.

### Podsumowanie

- Analiza DGA jest cennym narzędziem diagnostycznym, pozwalającym na ujawnienie jeszcze u producenta trudnych do wykrycia innymi metodami usterek wewnętrznych i anomalii w nowo produkowanych transformatorach.
- Celowe jest prowadzenie badań chromatograficznych zarówno podczas próby nagrzewania, jak i innych prób fabrycznych.
- Zebrane doświadczenia wykazały przydatność metody DGA również do oceny stanu technicznego transformatorów remontowanych i modernizowanych.
- Wyniki badań DGA transformatorów rozdzielczych są podobne do uzyskiwanych dla transformatorów mocy i stanowią źródło cennych informacji podczas prób typu i badań konstruktorskich.
- Niewłaściwie dobrane materiały konstrukcyjne, a także niektóre elementy osprzętu kadzi transformatorów mogą powodować pojawianie się gazów w oleju nie związane z jakimikolwiek usterekami nowo produkowanych jednostek i w efekcie błędną interpretację wyników DGA.

### LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa: Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. Wydawnictwo ZPBE Energopomiar- Elektryka. Gliwice 2001.
- [2] Olech W., Olejniczak H., Buchacz T. Skuteczność wykrywania uszkodzeń transformatorów metodą DGA zweryfikowana wynikami przeglądów wewnętrznych; *Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa Transformator 99*, Kołobrzeg 1999.
- [3] Raport Komitetu Studiów 12 CIGRE. *Electra* (1982) nr 82, str. 31-46.
- [4] IEC 61181 Application of DGA to factory test on electrical equipment, (1993).
- [5] IEC 60567 Guide for the sampling of gases and oil from oil – filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases, (1992).
- [6] ASTM D 3612 (2002): Analysis of gases dissolved in electrical insulating oil by gas chromatography.
- [7] Schmit J., Eitner E., Hartwig R. Gassing behavior of transformer oils at temperatures above 60°C, International Symposium of High Voltage Engineering, (1991).
- [8] Sobota J., Bourek W., Olech W., Olejniczak H. Badania specjalne olejowych transformatorów rozdzielczych w ALSTOM w T&D Zakład Transformatorów mocy, *Energetyka* (2002), nr 1, 169-174.

**Autor:** mgr inż. Teresa Buchacz, ZPBE Energopomiar-Elektryka, 44-101 Gliwice, ul. Świętokrzyska 2  
E-mail: [teresa.buchacz@elektryka.com.pl](mailto:teresa.buchacz@elektryka.com.pl)