

Małgorzata Kurpaska, Paweł Krześciński, Grzegorz Giełera

Received: 09.03.2017  
Accepted: 12.06.2017  
Published: 29.09.2017

## Wysiłkowa kardiografia impedancyjna – nowa technologia, nowe możliwości

### Impedance cardiography during exercise – new technology, new possibilities

Klinika Kardiologii i Chorób Wewnętrznych, Wojskowy Instytut Medyczny, Warszawa, Polska

Adres do korespondencji: Małgorzata Kurpaska, Wojskowy Instytut Medyczny, ul. Szaserów 128, 04-141 Warszawa, tel./faks: +48 261 816 389, e-mail: mkurpaska@wim.mil.pl

Department of Cardiology and Internal Diseases, Military Institute of Medicine, Warsaw, Poland

Correspondence: Małgorzata Kurpaska, Military Institute of Medicine, Szaserów 128, 04-141 Warsaw, tel./fax: +48 261 816 389, e-mail: mkurpaska@wim.mil.pl

#### Streszczenie

Kardioimpedancja wysiłkowa jest nieinwazyjną metodą hemodynamicznej oceny układu krążenia podczas wysiłku. Dzięki technologii opartej na morfologicznej analizie fali impedancji oraz zaawansowanemu filtrowaniu artefaktów możliwe jest wykonanie badania w czasie wystąpienia objawów. W wielu badaniach potwierdzono wysoką powtarzalność i dokładność kardioimpedancji wykonywanej w trakcie wysiłku. Dotychczasowe doświadczenia kliniczne wskazują na jej przydatność w obiektywizacji zgłaszanych dolegliwości, identyfikacji podłoża hemodynamicznego obserwowanych objawów, jak również subklinicznych zaburzeń funkcji układu sercowo-naczyniowego. Ocena jakościowa kształtu fali kardioimpedancji może być użyteczna w wykrywaniu zmniejszonej podatności lewej komory, dyssynchronii komór oraz przewodnienia. Analiza zmian parametrów hemodynamicznych w czasie wysiłku fizycznego może wspierać diagnostykę w chorobie niedokrwiennej serca, niewydolności serca, nadciśnieniu tętniczym i płucnym. Zmiany profilu przyrostu objętości wyrzutowej czy rzutu serca wyprzedzają objawy kliniczne i nieprawidłowości dotychczas wykrywane metodami standardowymi. Zatem zastosowanie kardioimpedancji wysiłkowej stanowi niewątpliwie wartość dodaną do klasycznych metod diagnostycznych, takich jak echokardiografia, testy wysiłkowe, co zauważono między innymi w wytycznych dotyczących wykonywania ergospirometrii z 2016 roku. Kardioimpedancja wysiłkowa jako badanie stosunkowo proste w wykonaniu, tanie i wiarygodne niewątpliwie będzie odgrywać coraz większą rolę w ocenie wydolności fizycznej pacjentów, szczególnie jako alternatywa dla oceny hemodynamicznej metodami inwazyjnymi. Dalsza ocena wartości klinicznej kardioimpedancji wysiłkowej powinna być celem przyszłych badań naukowych.

**Słowa kluczowe:** kardiografia impedancyjna, test wysiłkowy, niewydolność serca, nadciśnienie tętnicze

#### Abstract

Exercise impedance cardiography is a non-invasive method for the assessment of haemodynamic parameters of the cardiovascular system during exercise. Owing to the technology based on morphological analysis of the impedance signal and advanced artifact filtering, the method enables to perform a test at the onset of symptoms. High repeatability and accuracy of exercise impedance cardiography have been confirmed in a number of studies. Previous clinical experience indicates the utility of exercise impedance cardiography in the objectification of reported complaints, identification of haemodynamic background of the observed symptoms and subclinical cardiovascular dysfunction. Qualitative assessment of impedance cardiography waveform may be useful in the detection of left ventricular diastolic dysfunction, ventricular dyssynchrony and hypervolaemia. Evaluation of haemodynamic parameters during exercise may support the diagnosis of ischaemic heart disease, heart failure, arterial and pulmonary hypertension. Stroke volume profile or cardiac output alterations may precede clinical symptoms and abnormalities previously detected by standard methods. Therefore, exercise impedance cardiography is undoubtedly an added value to classical diagnostic methods such as the echocardiography or exercise tests. This is highlighted in the current 2016 guidelines for the implementation of ergospirometry. Exercise impedance cardiography, as a relatively simple, inexpensive and reliable test, is likely to play an increasingly important role in evaluating patients' physical capacity, particularly as an alternative to invasive haemodynamic methods. The clinical value of exercise impedance cardiography should be evaluated in future studies.

**Keywords:** impedance cardiography, exercise test, heart failure, hypertension

## WSTĘP

S poczynkowa kardiografia impedancyjna (*impedance cardiography*, ICG) jest od wielu lat stosowana z powodzeniem w ocenie stanu hemodynamicznego pacjentów kardiologicznych<sup>(1)</sup>. W związku z ograniczeniami metodycznymi, wynikającymi z artefaktów ruchowych w czasie aktywności fizycznej, zazwyczaj badanie to jest wykonywane w bezruchu<sup>(2,3)</sup>. Spoczynkowa ocena objętości wyrzutowej (*stroke volume*, SV), rzutu serca (*cardiac output*, CO), wskaźnika sercowego (*cardiac index*, CI) czy też systemowego oporu naczyniowego (*systemic vascular resistance*, SVR) może okazać się jednak nieadekwatna do zaburzeń hemodynamicznych związanych z wysiłkiem fizycznym. A to właśnie objawy związane z obciążeniem wysiłkiem (szybkie męczenie, duszność oraz bóle w klatce piersiowej) są głównymi dolegliwościami zgłaszanymi przez pacjentów kardiologicznych. Stąd też poszukuje się nowych metod diagnostycznych, które wyjaśnią przyczyny ograniczenia tolerancji wysiłku.

### WYSIŁKOWA KARDIOGRAFIA IMPEDANCYJNA – METODYKA

Dzięki postępowi technologicznemu od kilku lat istnieje możliwość wykonania ICG w warunkach maksymalnego wysiłku fizycznego, zarówno w czasie badań diagnostycznych (np. maksymalny test wysiłkowy), jak i w warunkach naturalnych (np. biegi długodystansowe). Założenia metodyczne są podobne, a uzyskiwanie dobrej jakości sygnału jest możliwe poprzez zastosowanie jego filtrowania i eliminację artefaktów. W ocenie wysiłkowej sprawdzają się urządzenia niewymagające oszacowania impedancji podstawowej, wykorzystujące morfologiczną analizę sygnałów zmiany impedancji (np. PhysioFlow, Manatec, Francja) (ryc. 1, tab. 1).

Rejestrowana metodą impedancji druga pochodna fali impedancyjnej ( $dZ/dt$ ) zawiera kilka charakterystycznych punktów: A, S i O. Ich ocena morfologiczna może być przydatna we wstępnej identyfikacji zaburzeń hemodynamicznych. Fala A odpowiada skurczowi przedsionków i występuje w późnym rozkurczu komór. Może być nieprawidłowa zarówno w arytmiiach przedsionkowych, jak i komorowych, wzrasta również przy dysfunkcji rozkurczowej lewej komory (*left ventricular diastolic dysfunction*, LVddf). Fala S odpowiada skurczowi komór i może być zdeformowana przy dyssynchronii komór. Fala O jest związana z otwarciem zastawki mitralnej i może narastać w zaostrzeniu niewydolności serca (*heart failure*, HF)<sup>(4)</sup>.

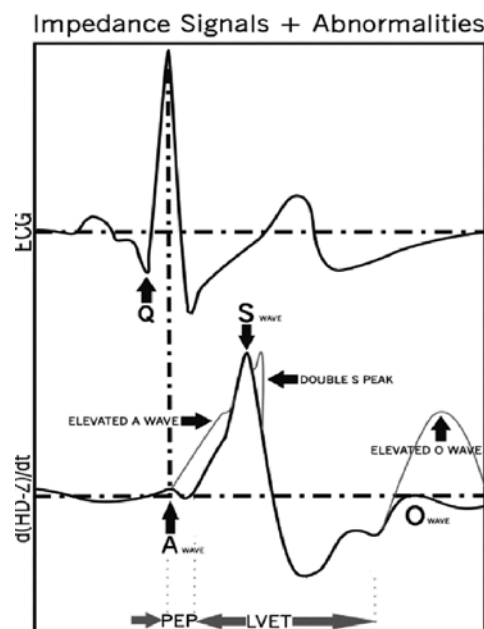
Poza możliwością oceny jakościowej morfologii fali impedancyjnej nowa technologia pozwala również na ilościową ocenę wybranych parametrów hemodynamicznych. Ocena CO w trakcie wysiłku ma fundamentalne znaczenie w szacowaniu tolerancji wysiłku zarówno u osób zdrowych, jak i chorych z HF<sup>(5,6)</sup>. Stąd też ICG wysiłkowa, jako badanie nieinwazyjne, stanowi wartościową alternatywę

## INTRODUCTION

Impedance cardiography (ICG) at rest has been used successfully for many years in the assessment of the haemodynamic status of cardiac patients<sup>(1)</sup>. The test is usually performed in a motionless condition due to methodological limitations in the form of motion artifacts resulting from physical movement<sup>(2,3)</sup>. However, an assessment of stroke volume (SV), cardiac output (CO), cardiac index (CI) and systemic vascular resistance (SVR) at rest may be inadequate in exercise-related haemodynamic disorders, and these are the symptoms associated with exercise load (easy fatigue, dyspnoea and chest pain) that are the main complaints reported by cardiac patients. Therefore, new diagnostic modalities to identify the cause of limited exercise tolerance are sought.

### EXERCISE IMPEDANCE CARDIOGRAPHY – METHODOLOGY

Technological advances have allowed to perform ICG under maximum exercise conditions in both diagnostic (maximal exercise testing) as well as natural setting (e.g. long distance running). Methodological assumptions are similar, and the use of filtering techniques to eliminate artifacts allows for obtaining good signal quality. Devices that do not require basic impedance estimation and utilise morphological analysis of impedance signal changes are useful in exercise tests (e.g. PhysioFlow, Manatec, France) (Fig. 1, Tab. 1).



Ryc. 1. Krzywa kardi impedancyjna i możliwe nieprawidłowości jej przebiegu (dzięki uprzejmości Franka Boura, PhysioFlow Inc. USA/Manatec Biomedical France)

Fig. 1. Impedance waveform and its possible abnormalities (owing to the kindness of Frank Bour, PhysioFlow Inc. USA/Manatec Biomedical France)

Fala <i>Wave</i>	Znaczenie kliniczne <i>Clinical importance</i>	Zmiany fizjologiczne <i>Physiological changes</i>	Zmiany patologiczne <i>Pathological changes</i>
Fala A <i>A-wave</i>	Odwzorowuje skurcz przedsionków (głównie lewego) i późnorozkurczowe napełnianie komór (odpowiada załamkowi P w EKG oraz fali A napływu mitralnego) <i>Mirrors atrial contraction (left atrium in particular) and late diastolic ventricular filling (corresponds to P-wave in ECG and mitral inflow A-wave)</i>	W niektórych przypadkach może być słabo widoczna <i>May be poorly visible in some cases</i>	Dobrze widoczna: zwężenie zastawki mitralnej, wysokie ośrodkowe ciśnienie żyłne Uniesiona: upośledzona podatność komór Nieobecna: migotanie przedsionków, skurcze przedwczesne przedsionkowe i komorowe, blok przedsionkowo-komorowy <i>Distinct: mitral stenosis, high central venous pressure</i> <i>Elevated: ventricular diastolic dysfunction</i> <i>Absent: atrial fibrillation, premature atrial and ventricular beats, atrioventricular block</i>
Fala S <i>S-wave</i>	Nachylenie ramienia wstępującego koreluje z kurczliwością miokardium, a wysokość fali z objętością wyrzutową i rzutem serca <i>Ascending curve inclination correlates with myocardial contractility, and the height of the waveform correlates with ejection volume and cardiac output</i>	Strome nachylenie sugeruje większą kurczliwość <i>Sharp inclination suggests increased contractility</i>	Niska amplituda: niski rzut serca „Pofałdowanie” ramienia wstępującego: niedomykalność zastawki mitralnej lub trójdzielnej, blok odnogi pęczka Hisa, stymulacja dwukomorowa, niewydolność serca Podwójny szczyt: dyssynchronia komór <i>Low amplitude: low cardiac output</i> <i>“Folded” ascending curve: mitral or tricuspid regurgitation, bundle branch block, biventricular pacing, heart failure</i> <i>Double peak: ventricular dyssynchrony</i>
Fala O <i>O-wave</i>	Odwzorowuje rozkurcz od momentu otwarcia zastawki mitralnej <i>Reflects diastole from the opening of the mitral valve</i>	Zwiększenie: na wdechu (efekt większego powrotu żylnego) Redukcja: podczas manewru Valsalvy, młody wiek <i>Increase: on inhale (the effect of increased venous return)</i> <i>Reduction: during Valsalva manoeuvre, young age</i>	Zwiększenie: zaostrzenie niewydolności serca, przy zwiększeniu powrotu żylnego (np. uniesienie nóg), niedomykalność zastawki mitralnej Redukcja: hipowolemia, diuretyki, nitraty, wazodylatatory <i>Increase: heart failure exacerbation, increased venous return (e.g. lower limb elevation), mitral increased venous return</i> <i>Reduction: hypovolaemia, diuretics, nitrates, vasodilators</i>

Tab. 1. Krzywa kardi impedancyjna – zmiany fizjologiczne i patologiczne

Tab. 1. Impedance cardiography waveform – physiological and pathological changes

diagnostyczną dla metod inwazyjnych. Metoda Ficka, uznawana za złoty standard oceny CO w warunkach spoczynkowych<sup>(7,8)</sup>, może być teoretycznie użyta podczas wysiłku<sup>(9)</sup>, ale w praktyce jako metoda inwazyjna nie znajduje powszechnego zastosowania<sup>(10)</sup>. Poniżej przedstawiono dowody naukowe potwierdzające wiarygodność diagnostyczną i wartość kliniczną kardi impedancji wysiłkowej w wybranych grupach chorych.

## PORÓWNANIE Z INNYMI METODAMI

W wielu badaniach potwierdzono wysoką powtarzalność i dokładność ICG wykonywanej w trakcie wysiłku. Porównując ICG z metodą referencyjną u zdrowych ochotników, uzyskiwano wysokie współczynniki korelacji CO:  $r = 0,94^{(11)}$ ,  $r^2 = 0,99^{(12)}$ . Również Siebenmann i wsp.<sup>(13)</sup> zaobserwowali zgodność wysiłkowego przyrostu CO w ocenie zmodyfikowaną metodą Ficka i ICG. U chorych z przewlekłą obturacyjną chorobą płuc i bezdechem Charloux i wsp.<sup>(14)</sup> wykazali, że średnie różnice pomiaru CO między metodami wynosiły 0,04 l/min w spoczynku i 0,29 l/min w czasie wysiłku. Istotna różnica między obiema metodami (>20%) wystąpiła jedynie w 2,5% przypadków w spoczynku i w 9,3% w trakcie wysiłku. Jest to wynik klinicznie akceptowalny. Wiarygodność wysiłkowej ICG w populacji pacjentów z HF potwierdzili Kemps i wsp.<sup>(15)</sup> Tonelli i wsp.<sup>(16)</sup> udowodnili zaś przydatność ICG w ocenie hemodynamicznej wydolności fizycznej u pacjentów z nadciśnieniem płucnym (zgodność oceny CO: ICG vs termodylucja  $r^2 = 0,75$ ). Należy być świadomym, że dokładność

The second derivative of impedance waveform (dZ/dt) contains several characteristic points: A, S and O. Their morphological assessment may be useful for the preliminary identification of haemodynamic disorders. The A-wave corresponds to atrial contraction and occurs in late ventricular diastole. It may be abnormal in both atrial and ventricular arrhythmias. It is also elevated in left ventricular diastolic dysfunction (LVddf). The S-wave corresponds to ventricular systole and may be deformed in ventricular dyssynchrony. The O-wave is associated with the opening of the mitral valve and may be elevated in heart failure (HF) exacerbation<sup>(4)</sup>.

In addition to the qualitative assessment of impedance waveform morphology, this new technology also allows for a quantitative assessment of selected haemodynamic parameters. CO assessment during exercise is crucial for the estimation of exercise tolerance in both healthy individuals and HF patients<sup>(5,6)</sup>. Therefore, exercise ICG is a valuable non-invasive diagnostic alternative for invasive modalities. Although the Fick method, which is considered the gold standard for evaluating CO at rest<sup>(7,8)</sup>, may be theoretically used during exercise<sup>(9)</sup>, however, it is not widely used in practice due to its invasive nature<sup>(10)</sup>. Below, we present scientific evidence confirming the diagnostic reliability and the clinical value of exercise impedance cardiography in selected groups of patients.

## COMPARISON WITH OTHER METHODS

High repeatability and accuracy of exercise ICG have been confirmed in a number of studies. High correlation

ICG w wykrywaniu subtelnych różnic CO może być ograniczona, jednakże nie wpływa to na możliwość oceny istotnych trendów związanych z odpowiedzią układu krążenia na wysiłek fizyczny, co ma największą wartość kliniczną<sup>(15)</sup>.

## CHOROBA NIEDOKRWIENNA SERCA

Przydatność ICG w ocenie hemodynamicznej w trakcie próby wysiłkowej w grupie pacjentów z chorobą niedokrwienią serca badali Dupuis i wsp.<sup>(17)</sup> Wykazano, że SV na szczycie wysiłku może być przy niedokrwieniu miokardium niższa niż mierzona 1 minutę przed osiągnięciem maksymalnej intensywności wysiłku. Zmiany profilu SV występowały wcześniej niż objawy podmiotowe i zmiany odcinka ST w elektrokardiogramie<sup>(17)</sup>. Może to wskazywać na wysoką czułość tej metody w wykrywaniu dysfunkcji krążenia wieńcowego poprzedzającej jawne kliniczne niedokrwienia. Przykład takiego zapisu zaprezentowano na ryc. 2.

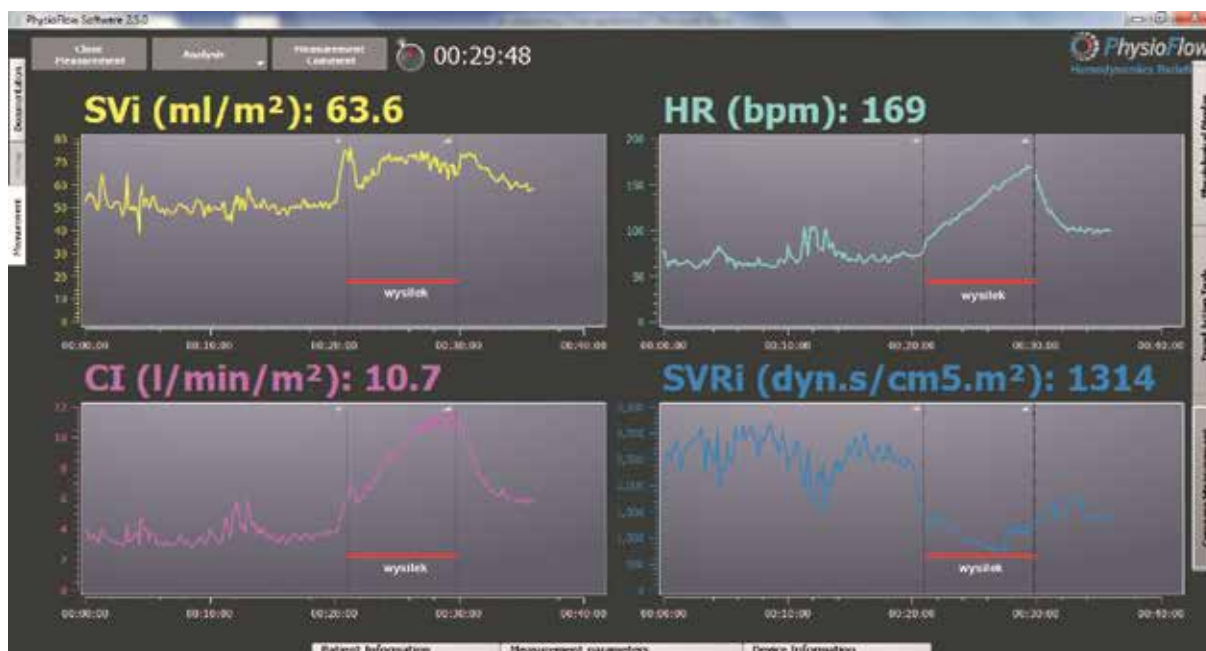
## DYSFUNKCJA ROZKURCZOWA LEWEJ KOMORY I NIEWYDOLNOŚĆ SERCA

Dysfunkcja rozkurczowa lewej komory wpływa na kształt krzywej ICG. U pacjentów z LVddf można zaobserwować wydłużenie czasu trwania fali O oraz fali A, a także wzrost amplitudy fali A. Często fala A zniekształca ramię

coefficients were obtained (CO:  $r = 0.94^{(11)}$ ,  $r^2 = 0.99^{(12)}$ ) when comparing ICG and a reference method in healthy volunteers. Siebenmann et al.<sup>(13)</sup> observed exercise-induced increase in CO in the assessment based on modified Fick method and ICG. Charloux et al.<sup>(14)</sup> showed that mean differences in CO measurements between the two methods used in patients with chronic obstructive pulmonary disease were 0.04 L/min at rest and 0.29 L/min during exercise. A significant difference between the two methods (>20%) was found only in 2.5% of cases at rest and 9.3% of cases during exercise. This result is clinically acceptable. The reliability of exercise ICG was confirmed in HF patients by Kemps et al.<sup>(15)</sup> Tonelli et al.<sup>(16)</sup> demonstrated the usefulness of ICG for the haemodynamic assessment of physical capacity in patients with pulmonary hypertension (conformity of CO: ICG assessment vs. thermodilution  $r^2 = 0.75$ ). It should be noted that although the accuracy of ICG in detecting subtle CO differences may be limited, this has no effects on the possibility to assess relevant trends in cardiovascular response to physical exercise, which has the greatest clinical value<sup>(15)</sup>.

## ISCHAEMIC HEART DISEASE

The usefulness of ICG for the haemodynamic assessment during cardiac stress test in a group of patients with ischaemic heart disease was investigated by Dupuis et al.<sup>(17)</sup>



Ryc. 2. Przykładowy zapis wysiłkowego badania kardiopedancyjnego (PhysioFlow, Manatec, Francja) u 61-letniej kobiety z dodatnią klinicznie i elektrokardiograficznie próbą wysiłkową. Spadek wskaźnika objętości wyrzutowej (stroke volume index, SVI) wystąpił na 2 min przed końcem wysiłku. W koronarografii uwidoczniło w początkowym odcinku gałęzi przedniej zstępującej zwężenie około 40–50%

Fig. 2. Exemplary record of exercise cardioimpedance examination (PhysioFlow, Manatec, France) in a 61-year-old woman with clinically and electrocardiographically positive exercise test. A decrease in the stroke volume index (SVI) was noted 2 minutes before the end of the exercise. Coronarography revealed 40–50% stenosis in the proximal left anterior descending artery

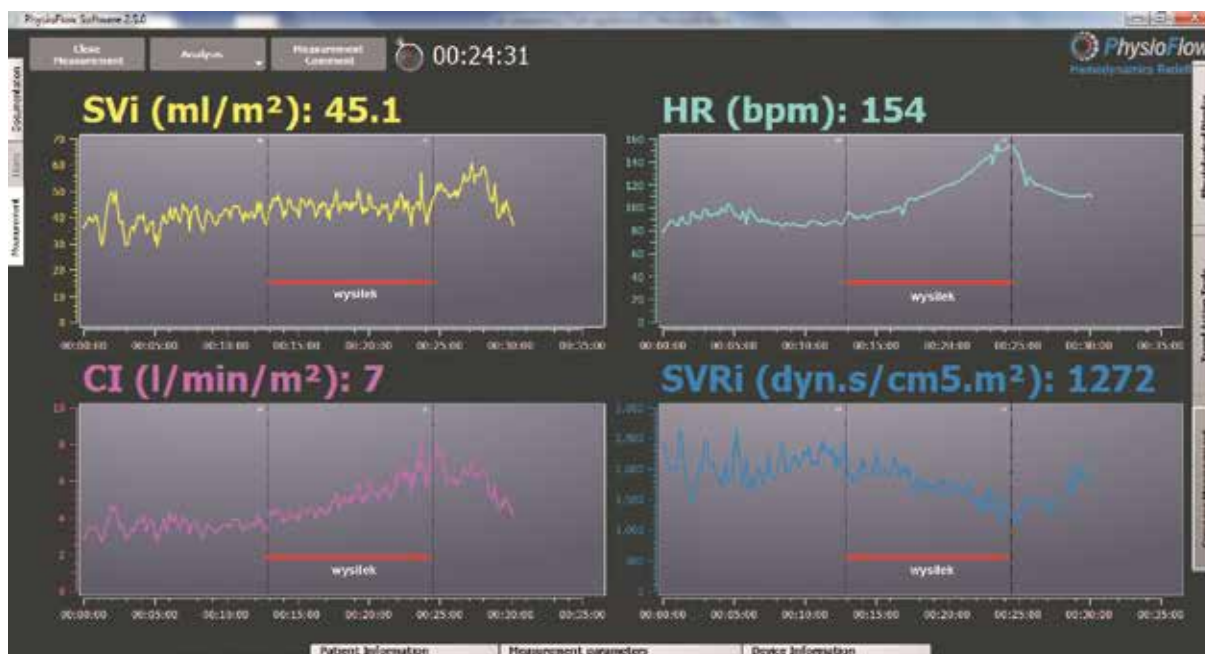
wznoszące fali S (możliwa jest również fuzja tych fal)<sup>(4)</sup>. To właśnie w grupie chorych z LVddf wysiłkowa ICG może ujawniać mechanizm ograniczenia wydolności fizycznej pomimo zachowanej frakcji wyrzutowej. Narastające w czasie wysiłku fizycznego upośledzenie rozkurczu LV, najczęściej związane z towarzyszącą sztywnością naczyniową, może prowadzić do istotnego przeciążenia ciśnieniowego krążenia płucnego, manifestującego się dusznością<sup>(18)</sup>. Wysiłkowa ICG umożliwia również identyfikację nieprawidłowości subklinicznych. Palmieri i wsp.<sup>(19)</sup>, badając bezobjawowych pacjentów z LVddf, wykazali, że charakteryzują się oni istotnie niższym wskaźnikiem rzutu serca (*cardiac index*, CI) i wskaźnikiem wyrzutowym (*stroke index*, SI) na szczycie wysiłku. Były to główne parametry różnicujące chorych z i bez LVddf, podczas gdy osiągnięte obciążenie (wyrażone w METs – *metabolic equivalent of task*, równoważnik metaboliczny), czas trwania wysiłku i szczytowe wysiłkowe ciśnienie tętnicze nie różniły się istotnie między tymi grupami<sup>(19)</sup>. Przykład takiego zapisu zaprezentowano na ryc. 3.

Nieprawidłowa odpowiedź serca jako pompy na zwiększone potrzeby metaboliczne spowodowane wysiłkiem jest główną przyczyną HF. Na istotną rolę pomiaru CO jako niezależnego parametru prognostycznego u chorych z HF wskazują ostatnie wytyczne dotyczące wykonywania ergospirometrii (*cardiopulmonary exercise test*, CPET)<sup>(20)</sup>. Nieinwazyjna ocena szczytowego CO (peakCO) zwiększa

It was demonstrated that peak exercise SV may be lower in ischaemic myocardium than SV measured 1 minute before reaching maximum exercise intensity. Changes in the SV profile preceded the symptoms and ST changes in the electrocardiogram<sup>(17)</sup>. This may indicate high sensitivity of this method in the detection of coronary dysfunction preceding clinically evident ischaemia. An example of this type of ICG recording is presented in Fig. 2.

### LEFT VENTRICULAR DIASTOLIC DYSFUNCTION AND HEART FAILURE

Left ventricular diastolic failure affects the shape of the ICG curve. Prolonged O-wave and A-wave duration as well as increased A-wave amplitude may be seen in patients with LVddf. The A-wave often distorts the ascending S-curve (fusion of these waves is also possible)<sup>(4)</sup>. Exercise ICG may reveal the mechanism of limited physical capability despite maintained ejection fraction in the group of patients with LVddf. Increasing impairment of LV diastole during physical exercise, most often associated with the accompanying vascular stiffness, may lead to significant pressure overload of the pulmonary circulation, which is manifested by dyspnoea<sup>(18)</sup>. Exercise ICG also enables the identification of subclinical abnormalities. Palmieri et al.<sup>(19)</sup> investigated asymptomatic patients with LVddf and showed that they were characterised by lower cardiac index (CI)



Ryc. 3. Przykładowy zapis wysiłkowego badania kardi impedancyjnego (PhysioFlow, Manatec, Francja) u 62-letniego mężczyzny (bez dolegliwości ze strony układu sercowo-naczyniowego, dobra tolerancja wysiłku fizycznego, frakcja wyrzutowa lewej komory 60%, napływ mitralny typowy dla upośledzonej relaksacji). Brak przyrostu wskaźnika objętości wyrzutowej (SVI) w czasie wysiłku: przed wysiłkiem (linia s) 44,9 ml/m<sup>2</sup>; na szczycie wysiłku (linia k) 45,1 ml/m<sup>2</sup>

Fig. 3. Exemplary record of exercise cardioimpedance examination (PhysioFlow, Manatec, France) in a 62-year-old man (no cardiovascular symptoms, good exercise tolerance, left ventricular ejection fraction 60%, impaired left ventricular relaxation). No increase of SVI while exercise: before the exercise (s-line) – 44.9 mL/m<sup>2</sup>, the exercise peak (k-line) – 45.1 mL/m<sup>2</sup>

wartość prognostyczną CPET opartą na szczytowym  $VO_2$  ( $peakVO_2$ )<sup>(21-23)</sup>. Udowodniono również, że nieinwazyjnie oceniony szczytowy rzut serca ( $peakCI/peakCO$ ) stanowi wartość dodaną do wskaźników niewydolności wentylacyjnej ( $VE/VCO_2$  slope) i  $peakVO_2$ , a kombinacja tych wskaźników zapewnia najskuteczniejszą stratyfikację ryzyka<sup>(24,25)</sup>. ICG wykonywana w trakcie wysiłku może być również przydatna w monitorowaniu parametrów hemodynamicznych podczas rehabilitacji kardiologicznej<sup>(26)</sup> i w wyborze optymalnych metod terapeutycznych<sup>(27)</sup>. Istotne znaczenie u pacjentów z HF ma wskaźnik wysokości fali O do S. Udowodniono, że stosunek ten koreluje liniowo z ciśnieniem zaklinowania w tętnicy płucnej (*pulmonary capillary wedge pressure*, PCWP) i może być zastosowany do identyfikacji zaawansowania HF. Wartość wskaźnika 0,5 koresponduje z PCWP = 10 mm Hg i wskazuje na nasilenie objawów odpowiadające klasie III wg NYHA, a wskaźnik powyżej 1,0 – klasie IV<sup>(28)</sup>.

## RESYNCHRONIZACJA

Terapia resynchronizująca serca (*cardiac resynchronization therapy*, CRT) stosowana jest u pacjentów z HF i niską frakcją wyrzutową oraz szerokim zespołem QRS<sup>(29)</sup>. Jednakże wielu pacjentów z czasem trwania QRS większym niż 120 ms nie prezentuje w badaniu echokardiograficznym dyssynchronii lewej komory<sup>(30)</sup>. Sugeruje się, że dyssynchronię można wykazać w inny sposób, np. oceniając morfologię krzywej impedancyjnej. Przy zaawansowanych zaburzeniach propagacji skurczu miokardium fala S może mieć bowiem wygląd dwufazowy (M-kształtny)<sup>(4)</sup>. Wykorzystując to zjawisko, wykazano użyteczność ICG w określeniu optymalnego czasu opóźnienia przedsionkowo-komorowego (AV delay) i międzykomorowego (VV delay) w CRT<sup>(31)</sup>.

## NADCIŚNIENIE PŁUCNE

Zastosowanie ICG podczas kontrolowanego wysiłku dostarcza klinicznie użytecznych informacji dotyczących nasilenia choroby i krótkoterminowego rokowania u pacjentów z nadciśnieniem płucnym. Ferreira i wsp.<sup>(32)</sup> stwierdzili, że wzrost CI  $\leq 1,5$ -krotnie oraz przewidywane szczytowe  $VO_2 < 50\%$  wartości należnej wiązały się z wieloma klinicznymi i funkcjonalnymi markerami stopnia zaawansowania choroby. Równocześnie zła odpowiedź CI okazała się predyktorem istotnego obniżenia  $peakVO_2$ . Wczesny spadek lub wypłaszczenie trendu SV, jak również zmiana SV od początku do szczytu wysiłku  $< 10$  ml okazały się markerami istotnego zaawansowania choroby<sup>(32)</sup>.

## PRZEWLEKŁA OBTURACYJNA CHOROBA PŁUC (POChP)

W związku z powysiłkową dynamiczną hiperinflacją i dużymi wahaniami ciśnienia wewnątrz klatki piersiowej

and stroke index (SI) at peak exercise. These were the main parameters differentiating between LVddf and non-LVddf patients, while the achieved energy expenditure (expressed in METs – the metabolic equivalent of task), exercise duration and peak exercise blood pressure did not differ significantly between these groups<sup>(19)</sup>. An example of this type of ICG recording is presented in Fig. 3.

Abnormal cardiac (pump) response to increased metabolic demand resulting from exercise is the main cause of HF. The significant role of the measurement of CO as an independent prognostic parameter in patients with HF was highlighted in the guidelines for cardiopulmonary exercise test (CPET)<sup>(20)</sup>. The non-invasive assessment of  $peakCO$  increases the prognostic value of CPET based on  $peakVO_2$ <sup>(21-23)</sup>. It was also demonstrated that the non-invasively assessed  $peakCI/peakCO$  is an added value to the indicators of ventilatory insufficiency ( $VE/VCO_2$  slope) and  $peakVO_2$ , and that the combination of these indicators ensures the most effective risk stratification<sup>(24,25)</sup>. ICG during exercise may be also useful in the monitoring of haemodynamic parameters during cardiac rehabilitation<sup>(26)</sup> as well as for the choice of optimal therapeutic methods<sup>(27)</sup>. The O/S-wave height ratio is also important in patients with HF. It was proven that there is a linear correlation between this ratio and pulmonary capillary wedge pressure (PCWP), and that it may be used to determine HF progression. A value of 0.5 corresponds with PCWP = 10 mm Hg and indicates symptom severity corresponding to NYHA class III, while a value above 1.0 – class IV<sup>(28)</sup>.

## RESYNCHRONISATION

Cardiac resynchronisation therapy (CRT) is used in patients with HF and low ejection fraction as well as a wide QRS complex<sup>(29)</sup>. However, many patients with QRS longer than 120 ms do not present left ventricular dyssynchrony in echocardiography<sup>(30)</sup>. It has been suggested that dyssynchrony may be identified using other methods, e.g. by assessing impedance curve morphology. The S-wave may have a biphasic (M-shaped) appearance in advanced impairment of myocardial propagation<sup>(4)</sup>. This phenomenon was used to demonstrate the usefulness of ICG for the determination of the optimal AV delay and VV delay in CRT<sup>(31)</sup>.

## PULMONARY HYPERTENSION

The use of ICG during controlled exercise provides clinically useful data on disease severity and a short-term prognosis in patients with pulmonary hypertension. Ferreira et al.<sup>(32)</sup> found that a  $\leq 1.5$ -fold increase in CI and predicted  $peakVO_2 < 50\%$  of the due value were associated with multiple clinical and functional markers of disease progression. At the same time, poor CI response was found to be a predictor of significant reduction in  $peakVO_2$ . An early drop or flattening of the SV trend as well as a change in the SV from the onset to peak exercise  $< 10$  mL were found to be markers of significant disease progression<sup>(32)</sup>.

monitorowanie stanu hemodynamicznego pacjentów z POChP w trakcie wysiłku może mieć istotne znaczenie kliniczne. Stwierdzono, że im większy jest stopień zaawansowania choroby, tym odpowiedź hemodynamiczna na wysiłek jest bardziej upośledzona (brak przyrostu CO)<sup>(33)</sup>. Okazuje się, że terapia uwzględniająca wyniki pomiarów ICG przynosi istotne korzyści<sup>(34,35)</sup>. Odpowiednio dobrane parametry wsparcia mechanicznego wentylacji, w tym optymalizacja dodatniego ciśnienia końcowo-wydechowego (*positive end-expiratory pressure*, PEEP), mogą poprawić SV i tolerancję wysiłku u wybranych pacjentów z zaawansowanym POChP, którzy cechują się szczególną hiperinflacją w spoczynku<sup>(36)</sup>.

## PODSUMOWANIE

Nowa technologia uzyskiwania zapisu krzywej kardiointepedancyjnej oparta na zaawansowanym filtrowaniu artefaktów umożliwi wiarygodną ocenę odpowiedzi układu krążenia na wysiłek fizyczny. Ocena jakościowa, uzupełniona o parametry hemodynamiczne charakteryzujące funkcję serca jako pompy, może być użyteczna w identyfikacji podłoża hemodynamicznego zgłaszanych dolegliwości, wykrywaniu zaburzeń subklinicznych, jak również oszacowaniu rokowania chorych kardiologicznych. W obliczu ograniczeń dotychczas stosowanych metod oceny wydolności wysiłkowej układu krążenia (inwazyjne metody oceny rzutu serca, ergospirometria) prostota i nieinwazyjność wysiłkowej ICG zachęca do rozpowszechnienia jej zastosowania w codziennej praktyce samodzielnie lub w powiązaniu z innymi uznanymi metodami diagnostycznymi. Niezbędne są jednak dalsze badania oceniające wartość diagnostyczną tej metody.

### Konflikt interesów

*Autorzy nie zgłaszają żadnych finansowych ani osobistych powiązań z innymi osobami lub organizacjami, które mogłyby negatywnie wpłynąć na treść publikacji oraz rościć sobie prawo do tej publikacji.*

### Źródło finansowania

*Praca wykonana w ramach projektu statutowego Wojskowego Instytutu Medycznego/Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (ID 336).*

## CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE (COPD)

Monitoring of the haemodynamic status of patients with COPD during exercise may be clinically important due to post-exercise dynamic hyperinflation and significant intrathoracic pressure fluctuations. It was found that the greater the disease progression, the more impaired the haemodynamic response to exercise (no CO increase)<sup>(33)</sup>. It turns out that a therapy based on ICG findings results in significant benefits<sup>(34,35)</sup>. Appropriately selected mechanical ventilatory support parameters, including positive end-expiratory pressure (PEEP) optimisation, may improve SV and exercise tolerance in selected patients with COPD who experience significant hyperinflation at rest<sup>(36)</sup>.

## SUMMARY

The new cardiac impedance recording technique based on advanced artefact filtering allows for a reliable assessment of cardiovascular response to physical activity. Qualitative evaluation supplemented with haemodynamic parameters characterising the cardiac function as a pump may be useful for identifying the haemodynamic background of reported complaints, detecting subclinical disorders as well as evaluating the prognosis of cardiac patients. In view of the limitations of the existing methods for the assessment of cardiovascular exercise capability (invasive methods for evaluating cardiac output, ergospirometry), the simplicity and non-invasiveness of exercise ICG encourage its increasingly common use in daily practice either alone or in combination with other recognised diagnostic methods. However, further research is necessary to assess the diagnostic value of this method.

### Conflict of interest

*The authors do not report any financial or personal connections with other persons or organizations, which might negatively affect the content of this publication and/or claim authorship rights to this publication.*

### Funding/Support and role of the sponsor

*The paper was prepared as part of the statutory project of the Military Institute of Medicine/Ministry of Science and Higher Education (ID 336).*

## Piśmiennictwo / References

- Krzesiński P, Gielerek G, Kowal J: Kardiografia impedancyjna – nowoczesne narzędzie terapii monitorowanej chorób układu krążenia. *Kardiologia* 2009; 67: 65–71.
- Siebert J: Kardiografia impedancyjna. Przewodnik dla lekarzy. Via Medica, Gdańsk 2006.
- Warburton DE, Haykowsky MJ, Quinney HA et al.: Reliability and validity of measures of cardiac output during incremental to maximal aerobic exercise. Part II: Novel techniques and new advances. *Sports Med* 1999; 27: 241–260.
- Bour J, Kellett J: Impedance cardiography: a rapid and cost-effective screening tool for cardiac disease. *Eur J Intern Med* 2008; 19: 399–405.
- Koike A, Hiroe M, Adachi H et al.: Oxygen uptake kinetics are determined by cardiac function at onset of exercise rather than peak exercise in patients with prior myocardial infarction. *Circulation* 1994; 90: 2324–2332.
- Matsumoto A, Itoh H, Yokoyama I et al.: Kinetics of oxygen uptake at onset of exercise related to cardiac output, but not to arteriovenous oxygen difference in patients with chronic heart failure. *Am J Cardiol* 1999; 83: 1573–1576, A8.
- Lipkin DP, Poole-Wilson PA: Measurement of cardiac output during exercise by the thermodilution and direct Fick techniques in patients with chronic congestive heart failure. *Am J Cardiol* 1985; 56: 321–324.
- Rubin SA, Siemenczuk D, Nathan MD et al.: Accuracy of cardiac output, oxygen uptake, and arteriovenous oxygen difference at rest, during exercise, and after vasodilator therapy in patients with severe, chronic heart failure. *Am J Cardiol* 1982; 50: 973–978.
- Yamabe H, Itho K, Yasaka Y et al.: Clinical application of cardiac output during ramp exercise calculated using the Fick equation – comparison with the 2-stage bicycle ergometer exercise protocol in the supine position. *Jpn Circ J* 1997; 61: 488–494.
- Baxley WA, Cavender JB, Knoblock J: Continuous cardiac output monitoring by the Fick method. *Cathet Cardiovasc Diagn* 1993; 28: 89–92.
- Richard R, Lonsdorfer-Wolf E, Charloux A et al.: Non-invasive cardiac output evaluation during a maximal progressive exercise test, using a new impedance cardiograph device. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85: 202–207.
- Broeder CE, Hickock J, Burditt A et al.: Does Advanced Cardiac Impedance Technology Accurately Measure Cardiac Output During Submaximal Steady State Exercise? Control/Tracking Number: 09-SA-3991-ACSM, Activity: Scientific Abstract, Current Date: 11/3/2008.
- Siebenmann C, Rasmussen P, Sørensen H et al.: Cardiac output during exercise: a comparison of four methods. *Scand J Med Sci Sports* 2015; 25: e20–e27.
- Charloux A, Lonsdorfer-Wolf E, Richard R et al.: A new impedance cardiograph device for the non-invasive evaluation of cardiac output at rest and during exercise: comparison with the “direct” Fick method. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 313–320.
- Kemps HM, Thijssen EJ, Schep G et al.: Evaluation of two methods for continuous cardiac output assessment during exercise in chronic heart failure patients. *J Appl Physiol* (1985) 2008; 105: 1822–1829.
- Tonelli AR, Alnuaimat H, Carrie R et al.: Value of Impedance Cardiography in Pulmonary Hypertension. *Chest* 2010; 138 (4\_MeetingAbstracts): 359A.
- Dupuis JM, Bour J, Abraham P et al.: Detection of Coronary Artery Disease (CAD) during Bicycle Exercise, using New Generation Impedance Cardiography. *Heart Journal* 2000; 83 (Suppl II).
- Zile MR, Lewinter MM: Left ventricular end-diastolic volume is normal in patients with heart failure and a normal ejection fraction: a renewed consensus in diastolic heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2007; 49: 982–985.
- Palmieri V, Russo C, Palmieri EA et al.: Isolated left ventricular diastolic dysfunction: implications for exercise left ventricular performance in patients without congestive heart failure. *J Am Soc Echocardiogr* 2006; 19: 491–498.
- Guazzi M, Arena R, Halle M et al.: 2016 focused update: clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Circulation* 2016; 133: e694–e711.
- Lang CC, Agostoni P, Mancini DM: Prognostic significance and measurement of exercise-derived hemodynamic variables in patients with heart failure. *J Card Fail* 2007; 13: 672–679.
- Goda A, Lang CC, Williams P et al.: Usefulness of non-invasive measurement of cardiac output during sub-maximal exercise to predict outcome in patients with chronic heart failure. *Am J Cardiol* 2009; 104: 1556–1560.
- Rosenblum H, Helmke S, Williams P et al.: Peak cardiac power measured noninvasively with a bioreactance technique is a predictor of adverse outcomes in patients with advanced heart failure. *Congest Heart Fail* 2010; 16: 254–258.
- Finocchiaro G, Haddad F, Knowles JW et al.: Cardiopulmonary responses and prognosis in hypertrophic cardiomyopathy: a potential role for comprehensive noninvasive hemodynamic assessment. *JACC Heart Fail* 2015; 3: 408–418.
- Myers J, Wong M, Adhikarla C et al.: Cardiopulmonary and non-invasive hemodynamic responses to exercise predict outcomes in heart failure. *J Card Fail* 2013; 19: 101–107.
- Sperandio PA, Borghi-Silva A, Barroco A et al.: Microvascular oxygen delivery-to-utilization mismatch at the onset of heavy-intensity exercise in optimally treated patients with CHF. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2009; 297: H1720–H1728.
- Borghi-Silva A, Oliveira CC, Carrascosa C et al.: Respiratory muscle unloading improves leg muscle oxygenation during exercise in patients with COPD. *Thorax* 2008; 63: 910–915.
- Woltjer HH, Bogaard HJ, Bronzwaer JGF et al.: Prediction of pulmonary capillary wedge pressure and assessment of stroke volume by noninvasive impedance cardiography. *Am Heart J* 1997; 134: 450–455.
- Ponikowski P, Voors AA, Anker SD et al.: 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC). Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC. *Eur Heart J* 2016; 37: 2129–2200.
- Bleeker GB, Schalijs MJ, Molhoek SG et al.: Relationship between QRS duration and left ventricular dyssynchrony in patients with end-stage heart failure. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2004; 15: 544–549.
- Adachi H, Hiratsuji T, Sakurai S et al.: Impedance cardiography and quantitative tissue Doppler echocardiography for evaluating the effect of cardiac resynchronization therapy: a case report. *J Cardiol* 2003; 42: 37–42.
- Ferreira EM, Ota-Arakaki JS, Barbosa PB et al.: Signal-morphology impedance cardiography during incremental cardiopulmonary exercise testing in pulmonary arterial hypertension. *Clin Physiol Funct Imaging* 2012; 32: 343–352.
- Vasilopoulou MK, Vogiatzis I, Nasis I et al.: On- and off-exercise kinetics of cardiac output in response to cycling and walking in COPD patients with GOLD Stages I–IV. *Respir Physiol Neurobiol* 2012; 181: 351–358.
- Nasis I, Kortianou E, Vasilopoulou M et al.: Hemodynamic effects of high intensity interval training in COPD patients exhibiting exercise-induced dynamic hyperinflation. *Respir Physiol Neurobiol* 2015; 217: 8–16.
- Carrascosa CR, Oliveira CC, Borghi-Silva A et al.: Haemodynamic effects of proportional assist ventilation during high-intensity exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Respirology* 2010; 15: 1185–1191.
- Oliveira CC, Carrascosa CR, Borghi-Silva A et al.: Influence of respiratory pressure support on hemodynamics and exercise tolerance in patients with COPD. *Eur J Appl Physiol* 2010; 109: 681–689.