

## Adaptacja oprogramowania interpretacyjnego do stanu pacjenta i celów diagnostycznych

Piotr Augustyniak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
*august@agh.edu.pl*

**Streszczenie:** Artykuł ten przedstawia wybrane koncepcje związane z adaptacją oprogramowania interpretacyjnego EKG do stanu pacjenta i celów diagnostycznych. Adaptacja diagnostyki - typowa w postępowaniu człowieka, lecz stanowiąca nowość w wersji zautomatyzowanej niesie ze sobą konieczność włączenia dodatkowej wiedzy medycznej w pętlę sprzężenia zwrotnego nadzorującą przebieg diagnostyki. Uwzględnienie dodatkowych atrybutów danych i wykorzystanie nowoczesnych technologii informatycznych i telekomunikacyjnych pozwala na symulowanie ciągłej obecności specjalisty kardiologa towarzyszącego pacjentowi w ruchu. Jednocześnie, oprogramowanie nie zakłada wyłączności decyzji diagnostycznej podejmowanej automatycznie i umożliwia jej weryfikację przez specjalistę na dowolnym etapie przetwarzania sygnału.

**Abstract:** This paper presents selected issues concerning the adaptation of ECG interpreting software to the patient status and diagnostic goals. The adaptation of diagnostic procedure - common in human action, but still absent in computerized processing raises the necessity of including of additional medical knowledge to the feedback loop controlling the diagnostic process. Considering the complementary data attributes and the use of modern information processing and digital communication techniques opens the opportunity to simulate a continuous presence of cardiology expert accompanying the patient in motion. At the same time, the software does not assume the exclusive correctness of the automated diagnosis and provides for a human expert verification tools at all stages of signal processing.

*Słowa kluczowe: automatyczna interpretacja EKG, telemedycyna, systemy autoadaptacyjne*

### 1. Wprowadzenie

Automatyczne systemy diagnostyczne używają zwykle oprogramowania interpretacyjnego, którego rolą jest ekstrakcja parametrów diagnostycznych z sygnałów i obrazów medycznych. Stosowane procedury są wypadkową wiedzy medycznej i choć zaletą jest standaryzacja procedur medycznych, stosowanie jednolitego oprogramowania niezależnie od cech osobniczych i stanu pacjenta, a także celu diagnostycznego jest przyczyną niskiej wiarygodności i przydatności otrzymywanych parametrów diagnostycznych [1-2]. Tymczasem wobec dynamicznego rozwoju elektronicznych układów reprogramowalnych nie ma obecnie przeszkód technologicznych, aby programowanie komputera interpretacyjnego na etapie jego produkcji zastąpić programową personalizacją jego funkcjonalności podczas użytkowania. Prowadzone obecnie prace badawcze stawiają sobie za cel opracowanie systemu adaptacyjnego dla potrzeb zdalnego nadzoru kardiologicznego [3]. Jego podstawowym założeniem jest nadzorowanie, uaktualnianie i wymiana procedur automatycznej interpretacji sygnału prowadzona zdalnie w oparciu o dynamikę stanu pacjenta oraz wiedzę o schematach postępowania kardiologicznego [4-5]. Podstawową zaletą takiego podejścia jest znacznie wierniejsza symulacja obecności i postępowania kardiologa, natomiast podstawową trudnością - brak standardów i wzorców postępowania. Obecne standardy (np. [6]) precyzują symptomy schorzenia i metodologię postępowania terapeutycznego po ich wystąpieniu, brak natomiast wskazówek dotyczących optymalnego opisu diagnostycznego pacjenta w stanie dynamicznym.

W opisie systemów adaptacyjnych szczególnie istotne jest stwierdzenie znacznej rozpiętości zmienności poszczególnych parametrów diagnostycznych, oraz rozmaitej ich istotności medycznej zależnej od stanu pacjenta. Konsekwencją jest uzupełnienie każdego parametru diagnostycznego o dwa atrybuty:

- okres ważności, będący - technicznie rzecz biorąc - maksymalnym okresem próbkowania danego parametru wynikającym z jego spodziewanej zmienności,
- priorytet, reprezentujący medyczną istotność informacji w kontekście bieżącego stanu pacjenta, wykorzystywany przy kontroli jakości oraz dynamicznym przydzielaniu zasobów.

Artykuł prezentuje metodę optymalizacji oprogramowania statycznego opartą na statystyce propagacji błędu oraz metodę ciągłej optymalizacji opisu diagnostycznego pacjenta w oprogramowaniu dynamicznym

rejestratora zdalnego. Wykorzystuje ona informację o diagnostycznej istotności i pożądanej dokładności poszczególnych parametrów diagnostycznych w najczęściej występujących patologiach kardiologicznych uzyskaną w wyniku studiów zachowań ekspertów. Wykrycie każdego symptomu implikuje przewartościowanie oczekiwań dotyczących dalszej diagnostyki, czego skutkiem jest zmiana częstotliwości i priorytetu raportowanych parametrów, a niekiedy wymiana procedur interpretacyjnych w urządzeniu zdalnym. Procedury obliczające rezultaty o większym znaczeniu są wymieniane na dokładniejsze wraz z przydzieleniem im większej ilości zasobów kosztem procedur pozostałych. Podobnie, wzrasta częstotliwość i priorytet raportowania parametrów diagnostycznych o większym znaczeniu kosztem parametrów pozostałych.

## 2. Aspekty adaptacji oprogramowania

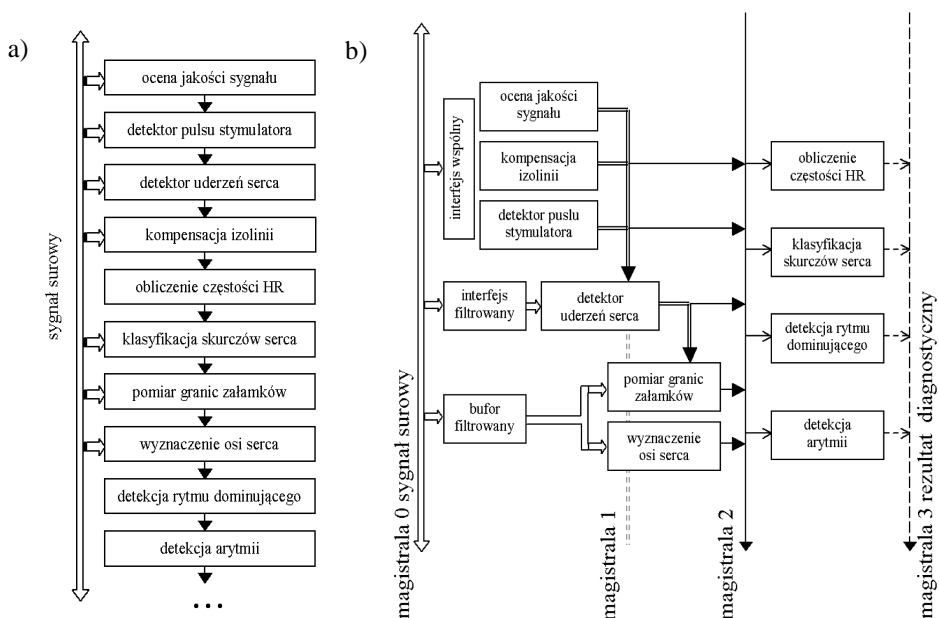
### 2.1. Optymalizacja statycznej architektury oprogramowania

Podczas optymalizacji architektury oprogramowania interpretacji elektrokardiogramu wykorzystano statystyczny opis danych oraz procedur uwzględniający ryzyko popełnienia błędu [7]. W przypadku sygnału opis ten reprezentuje jego jakość (np. poziom szumu), natomiast w przypadku procedur ich niezawodność. Ponieważ procedury zawierają założenia heurystyczne opracowane na podstawie analizy ograniczonego zbioru zapisów referencyjnych (zbioru uczącego), niezawodność jest dobrze reprezentowana przez prawdopodobieństwo pojawienia się danych wejściowych prowadzących do błędnych obliczeń. Warto w tym miejscu zauważyć, że wzrost niezawodności jest związany ze wzrostem złożoności obliczeniowej, co wykorzystuje interpretacja adaptacyjna polegająca na wymianie wersji procedur dokładniejszych na uproszczone lub odwrotnie, w zależności od priorytetu ich rezultatów [8].

Analiza jakości poszczególnych procedur diagnostycznych oraz propagacji błędu wzdłuż łańcucha funkcji w systemie interpretacji umożliwia otrzymanie architektury optymalnej jednocześnie dla dwóch kryteriów uznanych za najbardziej istotne w systemach rozproszonych:

- minimalnej spodziewanej wartości błędu,
- maksymalnej redukcji informacji w początkowych etapach przetwarzania.

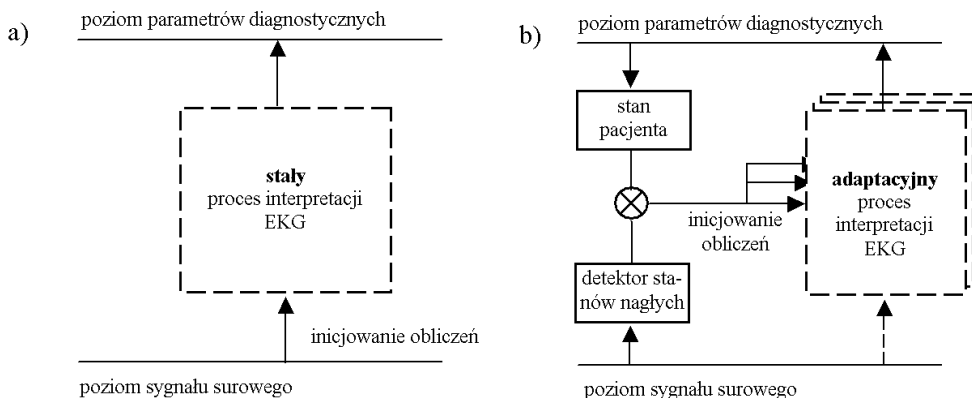
Rysunek 1 przedstawia przykład zoptymalizowanej architektury oprogramowania rejestratora zdalnego opartej na koncepcji magistral danych, w której - w stosunku do procedury standardowej - zredukowano ilość punktów dostępu do sygnału oraz skrócono łańcuch następujących po sobie procedur [9].



Rys. 1. Przykładowa architektura systemu programowej interpretacji EKG a) standardowa, b) zoptymalizowana dla dokładności rezultatu i redukcji informacji

## 2.2. Interpretacja wyzwalana zdarzeniem

Każdy z parametrów diagnostycznych jest wyposażony w atrybut terminu ważności reprezentujący jego spodziewaną zmienność, a zatem minimalną częstotliwość uaktualniania. Zatem interpretacja zapisu EKG, zamiast być wykonywana w stałych odstępach czasu, może być wyzwalana zdarzeniem polegającym na stwierdzeniu upływu terminu ważności. Żądanie uaktualnienia wybranego parametru diagnostycznego rozpoczyna się od sprawdzenia upływu terminu ważności parametrów pośrednich i przeprowadzenia obliczeń uaktualniających tylko dla tych z nich, które uległy dezaktualizacji. Żądanie obliczeń jest propagowane w łańcuchu procedur w kierunku przeciwnym do przepływu informacji diagnostycznej. Unikanie obliczeń parametrów, których wartość jest jeszcze aktualna przyczynia się do znacznej oszczędności mocy obliczeniowej. Częstotliwość uaktualniania wartości poszczególnych parametrów diagnostycznych jest zdeterminowana poprzez cel diagnostyczny i stan pacjenta (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy procesu interpretacji EKG wyzwalanego upływem ważności parametrów diagnostycznych lub nagłą zmianą stanu pacjenta

Nagła zmiana rzeczywistego stanu pacjenta może spowodować konieczność zmiany zawartości lub częstotliwości raportu niezależnie od znanego przez system stanu pacjenta. Taka sytuacja jest obsługiwana przez detektor stanów nagłych zawierający obliczeniowo proste procedury dostarczające parametry zmieniające się wraz ze zmianą stanu pacjenta w szerokim zakresie stanów. Detektor stanów nagłych pracuje w sposób ciągły dokonując przetwarzania rejestrowanego sygnału w czasie rzeczywistym. W prototypowej implementacji wybrano częstość akcji serca HR jako parametr monitorowany w celu detekcji stanów nagłych.

Adaptacyjne przetwarzanie sygnału EKG w rejestratorze zdalnym o ograniczonych zasobach implikuje faworyzowanie parametrów diagnostycznych uznanych za szczególnie istotne dla optymalnego opisu pacjenta, kosztem marginalizacji a nawet wykluczenia innych parametrów. Wynika z tego, nie tylko przesyłanie raportu diagnostycznego w nieregularnych odstępach czasu, ale również adaptacyjny format raportu. Poszczególne raporty są niejednorodne co do zawartości - niektóre parametry diagnostyczne są przesyłane w każdym raporcie, a niektóre - mniej istotne - sporadycznie.

## 3. Dyskusja

Artykuł przedstawia wybrane kierunki rozwojowe automatycznej interpretacji zapisu EKG w rozproszonych systemach zdalnego nadzoru. Prezentowany adaptacyjny system telediagnostyczny został przetestowany przy użyciu pary współpracujących urządzeń, co można uznać za skalowo ograniczony prototyp systemu nadzoru kardiologicznego. Podczas prac badawczych wyodrębniono i przetestowano zarówno najważniejsze, przedstawione tutaj zagadnienia, jak i wiele innych problemów mniejszej wagi. Szczegóły implementacji i ilościowe wyniki testów są podane w literaturze. Przeprowadzone testy prowadzą do wniosku, że auto-adaptacyjny system nadzoru prawidłowo dostosowuje parametry przetwarzania do potrzeb diagnostycznych i optymalizuje użycie zasobów sprzętowych. Znaczna część zachowań systemu jest zgodna z wynikami obserwacji analogicznych zachowań u personelu, a w ponad 80% przypadków rezultatem wymiany fragmentu oprogramowania w urządzeniu zdalnym jest poprawa jakości obliczanych przez nie parametrów diagnostycznych.

Mechanizmy adaptacji zostały oparte na nowatorskim założeniu, że diagnostyka jest procesem dynamicznym, automatyczna interpretacja jest zatem świadkiem procesu zmian chorobowych a nie zastanego stanu patologicznego. Implikuje to uzależnienie sposobu przetwarzania oraz bieżących wartości rezultatów diagnostycznych od historii pacjenta (i stanowi niewątpliwie zaletę), ale zmniejsza powtarzalność wyniku (co utrudnia weryfikację funkcjonowania programu). Istotną cechą przedstawionych kierunków ewolucji oprogramowania jest porzucenie sztywnych ram organizacyjnych procesu interpretacji i zbliżenie przepływów informacji w programie do rozumowania specjalisty-kardiologa na razie dopiero fragmentarycznie poznanego na drodze obserwacji jego postępowania diagnostycznego.

Programowa adaptacja funkcjonalna kardiomonitora telemetrycznego (ang.: *software modulated functionality*) ma wielkie znaczenie praktyczne dla wszystkich trzech uczestników procesu nadzoru:

- producent może stosunkowo tanio na masową skalę wytwarzać rejestratory ogólnego przeznaczenia wyposażone jedynie w uniwersalną podstawową warstwę oprogramowania,
- pacjent po krótkim czasie użytkowania i adaptacji systemu dysponuje wysoko spersonalizowanym rejestratorem uwzględniającym jego (a nie uśrednione) warunki stanów patologicznych, szybko reagującym na zmiany i przesyłającym optymalny raport o minimalnej objętości danych
- lekarz dysponuje opisem diagnostycznym pacjenta optymalnym z punktu widzenia postawionego celu diagnostycznego spełniającym założone normy jakościowe, a zmiany funkcjonalności rejestratora mogą być w szerokim zakresie wykonane bez konieczności osobistego kontaktu z pacjentem.

Przedstawione w artykule kierunki rozwojowe spełniają założenia o dostosowaniu technicznego otoczenia człowieka do własności człowieka, co ma szczególne znaczenie w zastosowaniach medycznych.

#### 4. Podziękowania

Praca naukowo-badawcza zrealizowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2007, nr grantu 3T11E00127

#### 5. Literatura

- [1] Fayn J. et al., Towards New Integrated Information and Communication Infrastructures in E-Health. Examples from Cardiology, *Computers in Cardiology*, vol. 30, pp.113–116, 2003
- [2] Pinna G. D. et al., Home Telemonitoring of Chronic Heart Failure Patients: Novel System Architecture of the Home or Hospital in Heart Failure Study, *Computers in Cardiology*, vol. 30, pp. 105-108, 2003.
- [3] Augustyniak P., Content-Adaptive Signal and Data in Pervasive Cardiac Monitoring, *Computers in Cardiology*, vol. 32, pp. 825-828, 2005
- [4] Augustyniak P., Tadeusiewicz R. Modeling of ECG Interpretation Methods Sharing Based on Human Experts Relations, *Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference New York City, USA*, str. 4663-4669, Aug 30-Sept 3, 2006
- [5] Augustyniak P., Tadeusiewicz R. Assessment of electrocardiogram visual interpretation strategy based on scanpath analysis *Physiological Measurement* vol. 27, pp. 597-608, 2006.
- [6] Polskie Towarzystwo Kardiologiczne Standardy postępowania w badaniu Holterowskim. Warszawa, nakładem PTK, 1997.
- [7] Straszecka E., Straszecka J. Uncertainty and imprecision representation in medical diagnostic rules. *IFMBE Proc*, Medicon 2004, paper 172
- [8] Paoletti M., Marchesi C. Low computational cost algorithms for portable ECG monitoring units. *IFMBE Proc*. Medicon 2004, paper 231
- [9] Tadeusiewicz R, P. Augustyniak P. Information Flow and Data Reduction in the ECG Interpretation Process [in:] Zhang Y.T., Xu L.X., Roux C., Zhuang T.G., Tamura T., Galiana H.L. (eds.): *Innovation from Biomolecules to Biosystems*. IEEE 27-th Annual IEEE-EMBS Conference, paper nr 88, 2005,