

Ahmet Duyar, Artesis Technology Systems AS, Gebze, Turcja  
 Ryszard Nowicki, GE Power Controls Sp. z o.o., Poznań, Polska  
 Ömer Faruk Eker, Artesis Technology Systems AS, Gebze, Turcja

## ZRÓŻNICOWANIE SYSTEMÓW ON-LINE MONITOROWANIA STANU TECHNICZNEGO SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

### THE DIVERSITY OF ON-LINE CONDITION MONITORING SYSTEMS OF ELECTRIC MOTORS

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano system wspomagania działania służb Utrzymania Ruchu (UR) wykorzystujący systemy zabezpieczenia pracy silników elektrycznych, które umożliwiają gromadzenie dynamicznych przebiegów czasowych wielkości elektrycznych. System ten zbudowany na bazie Internetu przemysłowego, umożliwia generowanie wzorca symptomu stanu technicznego (ST) odpowiadającego stanowi normalnemu, wzorca granicznego, a także na bazie zaszytej inteligencji wspomaga rozpoznanie przyczyn pojawienia się stanu nienormalnego. Omówiono testową instalację systemu przeprowadzoną w rafinerii oraz zaprezentowano wybrane przykłady oceny.

**Abstract:** This paper describes a new maintenance tool, which is built over Industrial Ethernet. As a source of data are used waveforms of electrical signals available from professional motor protection systems. The system is able to create patterns describing normal and abnormal technical condition of a production asset or provided production process, and estimate reasons of abnormalities. The system was installed in a refinery. Some examples of system discovering are presented.

**Słowa kluczowe:** stan techniczny, zabezpieczenia elektryczne silników, przebiegi czasowe, utrzymanie ruchu  
**Keywords:** technical condition, motor protection relays, waveforms, maintenance

#### Skróty

AES – ARTESIS Enterprise Server =  
 = Korporacyjny serwer ARTESIS  
 CMMS - Computerized Maintenance Management System  
 GPS – Generator Protection System  
 HMI - Human-Machine Interface  
 MPS – Motor Protection System  
 OLE - Object Linking and Embedding  
 OPC - Open Platform Communications =  
 = OLE for Process Control  
 SAD – Serwer Akwizycji Danych  
 ST - Stan Techniczny  
 UR - Utrzymanie Ruchu

#### 1. Wstęp

Nadzór ST silników elektrycznych może być realizowany w zróżnicowany sposób w zależności od strategii UR zaplanowanej dla maszyn roboczych, które silniki napędzają [1], [2]. Zazwyczaj bardziej zaawansowana strategia jest stosowana dla agregatów wyższej ważności (co na ogół jest skorelowane z mocą napędów). Dla maszyn dużej i średniej ważności zalecane jest, zgodnie z wymaganiami standardu API 670 [3], monitorowanie węzłów łożyskowych w zakresie pomiarów drgań i temperatur oraz monitorowanie temperatur uzwojeń. Standard ten zaleca

włączenie w/w pomiarów do zintegrowanego systemu monitorowania i zabezpieczeń.

W przypadku silników pracujących na średnim napięciu stosowane są także często zabezpieczenia elektryczne. Bardziej zaawansowane systemy zabezpieczeń posiadają także możliwość podłączenia czujników temperatur: przede wszystkim otoczenia ale także uzwojeń, węzłów łożyskowych oraz oleju w systemie smarowania. Wymienione pomiary temperatury mogą być wykorzystywane w przypadkach, w których nie jest stosowany nadzór zgodny ze standardem API 670.

Dla agregatów średniej ważności, a także takich, które nie umożliwiają łatwej instalacji czujników we wszystkich węzłach agregatu, preferencją użytkownika może być wykorzystanie sprzętowego systemu detekcji anomalii [4], [5], [6]. Atrakcyjność monitorowania anomalii wynika ze sposobu instalowania sensorów sygnałów dynamicznych: są one instalowane w szafach sterowniczych, z których prowadzone jest zasilanie do silników.

Rozwiązania takie bywają efektywnie stosowane np. dla agregatów pomp zatapialnych, pomp pionowych (tu w przypadku monitoro-

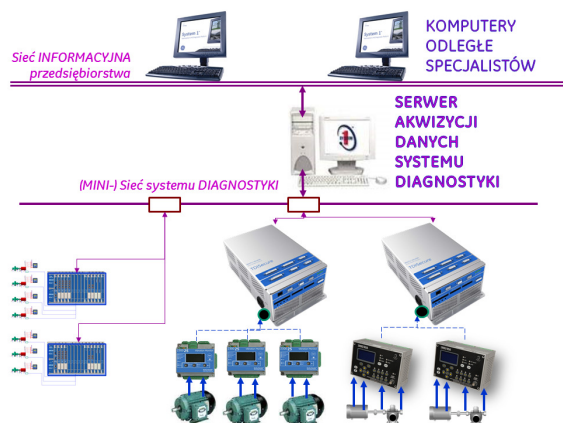
wania drgań mechanicznych pewne problemy instalacyjne mogą dotyczyć utwierdzenia czujników drgań w węzle łożyskowym pompy), a także w przypadku agregatów wykorzystywanych w strefach zagrożenia wybuchowego (np. w kopalniach z zagrożeniem metanowym).

Celem artykułu jest pokazanie nowej możliwości rozwiązania systemowego, które umożliwia lepszą kontrolę ST agregatów wyposażonych w zaawansowane zabezpieczenia elektryczne.

## 2. UR warunkowane stanem technicznym

Dla predykcyjnego (lub jeszcze bardziej zaawansowanego) UR niezbędne jest zastosowanie jakiegoś systemu diagnostyki [2]. W tym celu mogą być wykorzystywane:

A. Systemy diagnostyki kompatybilne sprzętowo i programowo z systemami monitorowania i zabezpieczeń. Przykładem może być SYSTEM 3500, który posiada wewnętrzny procesor komunikacyjny (TDI) umożliwiający konwersję i transmisję danych dynamicznych (+ statycznych) do serwera akwizycji danych (=SAD) systemu diagnostyki, na którym zainstalowane jest oprogramowanie SYSTEM 1. Rozwiązanie takie pokazano z lewej strony Rys. 1.



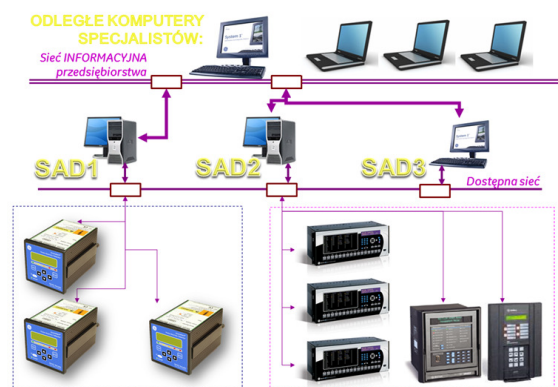
Rys. 1. Rozwiązanie systemowe kompatybilne sprzętowo i programowo wspomagające zaawansowane UR

B. Systemy diagnostyki, które mimo że nie są sprzętowo kompatybilne z wykorzystywanymi systemami monitorowania i zabezpieczeń, to dzięki zewnętrznym procesorom komunikacyjnym, umożliwiają akwizycję i analizę sygnałów. Przykład takiego rozwiązania, które wykorzystuje zewnętrzny procesor komunikacyjny TDISecure [6], umożliwiający transmisję sygnałów do

systemu SYSTEM 1 pokazano w prawej części Rys. 1.

Systemy diagnostyki wymienione w punktach (A) i (B) pracują z sygnałami analogowymi, a do systemu diagnostyki z procesora komunikacyjnego przekazywane są w postaci cyfrowej przebiegi czasowe. Gromadzenie danych, dalsze przetwarzanie sygnałów oraz wizualizacja, są realizowane na serwerze systemu diagnostyki.

C. Systemy diagnostyki, posiadające możliwość akwizycji funkcji będących wynikiem przetworzenia sygnałów dynamicznych. Funkcją taką jest np. analiza widmowa. Zadaniem systemu diagnostyki jest w tym przypadku konwersja danych (tu charakterystycznych składowych widma) w informacje użyteczne dla służb UR mówiące np. o (i) jakości zasilania, (ii) ST obwodów elektrycznych silnika, (iii) ST napędzanej przez silnik maszyny, etc.



Rys. 2. Rozwiązania systemowe umożliwiające wnioskowanie o ST bazując na analizach widmowych prądów / napięć wspomagające zaawansowane UR

W lewej dolnej części Rys. 2 pokazano systemy AnomAlert [4], [5], [6], służące do monitorowania anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi. Systemy te wykonują m.in. analizę widmową. Dane z sensorów są gromadzone i przetwarzane przez specjalizowane monitory, które w dalszej kolejności są podłączone do różnych SAD'ów.

Jako rozwiązanie systemowe, możliwość akwizycji danych z systemów zabezpieczeń elektrycznych została pierwotnie wykorzystana i wdrożona w systemie diagnostyki SYSTEM 1 dla zabezpieczeń silników klasy MULTILIN (specjalny RuelPak, tzn. oprogramowanie o funkcjonalności ekspertowej, dokonuje konwersji wyekstrahowanych danych statycznych na in-

formacje użyteczne dla służb UR). SYSTEM 1, jako system wielofunkcyjny, umożliwia także zarządzanie danymi statycznymi dostępnymi z systemów AnomAlert (możliwość prezentacji danych statycznych dedykowanych anomaliiom po stronie stanu mechanicznego agregatu oraz w zakresie stanu elektrycznego silnika i jego zasilania). Maksymalnie do pojedynczego SAD SYSTEM 1 (przyjmijmy, że jest to SAD1) można podłączyć do 100 monitorów AnomAlert.

Jak wynika z powyższego opisu interfejsowanie systemów AnomAlert z SYSTEM 1 jest zrealizowane w ograniczonym zakresie, bowiem nie daje możliwości prezentacji (i wykorzystania) analizy widmowej generowanej przez monitory anomalii.

Alternatywnie, prezentacja danych z monitorów AnomAlert jest możliwa w systemie monofunkcyjnym, jakim jest specjalizowane oprogramowanie firmy ARTESIS dedykowane tym monitorom: ARTESIS MCM-SCADA. W tym przypadku do pojedynczego SAD'a ARTESIS można podłączyć maksymalnie do 200 monitorów AnomAlert.

MCM-SCADA oprócz prezentacji danych statycznych zapewnia także prezentację analiz widmowych w zakresie *widma normalnego*, *widma granicznego* (widma te są wypracowywane w fazie samouczenia się urządzenia monitorującego – przykład takich widm pokazano w [5]) oraz *widma bieżącego*. Możliwość oglądania wymienionych widm daje szybki pogląd tak na stan techniczny agregatu jak i realizowanego procesu, a w przypadku sygnalizowania jakiejś anomalii umożliwia specjalistom krytyczne spojrzenie na dane źródłowe stanowiące podstawę sformułowanej oceny.

W dolnej prawej części Rys. 2 pokazano grupę zabezpieczeń silników elektrycznych (na przykładzie produktów z serii GE MULTILIN), które umożliwiają gromadzenie dynamicznych przebiegów czasowych sygnałów elektrycznych. Dotychczas nie było dostępne rozwiązanie systemowe umożliwiające dla tego typu monitorów/zabezpieczeń gromadzenie danych, ich inteligentne przetwarzanie oraz prezentację podobną do tej, jaką umożliwia MCM-ARTESIS.

Podjęto zatem zadanie opracowania takiego rozwiązania systemowego, które umożliwiłoby, w ramach przemysłowej sieci zakładowej [8], prowadzenie bardziej zaawansowanego nadzoru ważnych agregatów napędzanych silnikami

elektrycznymi i zabezpieczonych elektrycznie systemami udostępniającymi akwizycję sygnałów dynamicznych w postaci cyfrowej. Opracowany został system iMCM, który opisano w kolejnym punkcie.

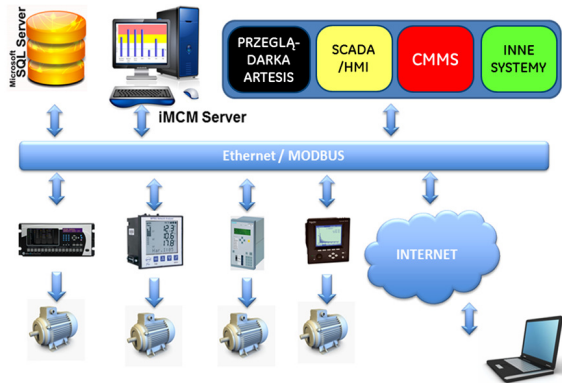
### 3. Nowe rozwiązanie systemowe iMCM

Punktem wyjścia do budowy nowego systemu jest doświadczenie zgromadzone przy wdrażaniu sprzętowego systemu detekcji anomalii AnomAlert. Funkcjonalność monitorów AnomAlert zapewnia m.in. akwizycję danych dynamicznych, ich pierwotny post processing prowadzący się do wykonywania analizy widmowej, proces samouczenia się na okoliczność wygenerowana *widm: normalnego* oraz *granicznego*, a także wtórny post processing w ramach którego, w oparciu o *widmo bieżące*, generowana jest nie tylko ocena w kategoriach stan *normalny* versus *nienormalny*, ale także w przypadku rozpoznania anomalii, w oparciu o inteligentne algorytmy wnioskowania, ma miejsce ocena najbardziej prawdopodobnych przyczyn jej wystąpienia.

Produkty MULTILIN (jak np. M60) są stosowane do zabezpieczeń, a więc mogą być również wdrażane dla napędów znajdujących się już w złym ST. Systemy takie nie dają zatem możliwości zaszcicia w nich procedur inteligentnego wnioskowania o ST, ani tym bardziej procedur samouczenia w fazie użytkowania następującej bezpośrednio po wdrożeniu.

Dodanie takiej funkcjonalności jest możliwe na poziomie oprogramowania systemowego, np. z poziomu SAD'a dedykowanego temu zadaniu.

W konsekwencji został opracowany specjalizowany system iMCM, który umożliwia akwizycję danych z dużej grupy monitorów i zabezpieczeń silników elektrycznych (w tym m.in. M60 MPS, 469 MPS, 369 MPS, 339 MPS), a także generatorów (w tym m.in. G60 GPS). Wszystkie wymienione systemy zabezpieczeń posiadają możliwość gromadzenia danych dynamicznych dla prowadzonych pomiarów elektrycznych i posiadają wyjście sprzętowe umożliwiające link sieciowy do SAD. Na Rys. 3 pokazano strukturę systemu, który może być zaimplementowany na bazie istniejącej już infrastruktury sieci przemysłowej.



Rys. 3. Struktura systemu akwizycji danych z MPS'ów

Serwer iMCM zajmuje się gromadzeniem danych dynamicznych i poprzez zabezpieczenie sieciowe komunikuje się z serwerem ARTESIS (=AES), który jest bezpośrednio odpowiedzialny za proces oceny ST. AES dodatkowo gromadzi również wybrane dane z serwera procesowych danych historycznych, co umożliwia zwiększenie poprawności wnioskowania o ST w przypadkach, w których symptomy ST są znacząco skorelowane ze zmiennymi procesowymi.

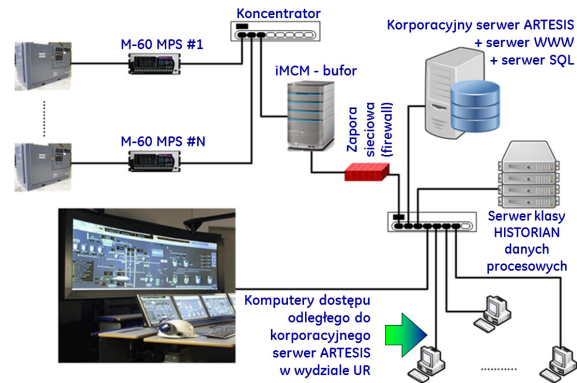
Po opracowaniu systemu przystąpiono do jego testowania.

#### 4. Testowe wdrożenie systemu

Pierwsze testowe wdrożenie systemu iMCM/AES zrealizowano w Rafinerii Kirikkale w Turcji (62 000 b/d w roku 2014) [9], w której napędy ważnych agregatów są zasilane 3-fazowo i nadzorowane z pomocą zabezpieczeń elektrycznych M60 MPS. Celem wdrożenia było z jednej strony zwiększenie produktywności oraz efektywności działania rafinerii, z drugiej natomiast zweryfikowanie poprawności i skuteczności działania opracowanego systemu.

Przystępując do implementacji postawione zostały ze strony rafinerii dodatkowe wymagania:

- implementacja zostanie dokonana w sposób nie zaburzający ciągłości produkcji,
- skonfigurowanie wykorzystywanych już w procesie produkcyjnym systemów SCADA/DCS nie zostanie naruszone,
- wprowadzenie dodatkowych elementów systemowych nie spowoduje negatywnego oddziaływania na pracujące już w sieci systemy,
- zapewnione zostanie pełne bezpieczeństwo cybernetyczne.



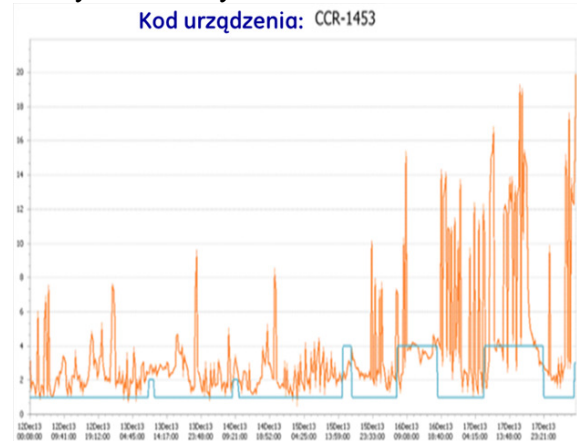
Rys. 4. Struktura systemu uruchomionego w testowej rafinerii

Strukturę wdrażanego systemu pokazano na Rys. 4. Dane gromadzone z MPS'ów są przesyłane do serwera iMCM z wykorzystaniem istniejącej sieci przemysłowej (wykorzystywanej także na okoliczność realizacji różnych innych zadań). Serwer iMCM komunikuje się poprzez zapórę sieciową z AES. Na AES zaimplementowane jest oprogramowanie wykorzystujące inteligentne procedury wnioskowania o stanie technicznym, podobne do tych, jakie są wykorzystywane w sprzętowym systemie rozpoznawania anomalii AnomAlert.

#### 5. Przykłady wnioskowania

Na Rys. 5 pokazano trend miary zmiany ST sprężarki śrubowej (wzrost wartości dla osi Y świadczy o większej nienormalności bieżącego ST w stosunku do stanu uznanego za *normalny*).

Podjęto decyzję o odstawieniu agregatu i dokonaniu jego przeglądu. Stwierdzono uszkodzenie łożyska silnika oraz zanieczyszczenie uzwojeń stojana rozbryzganym spalonym smarem łożyskowym – vide Rys. 6.



Rys. 5. Indykacja zmiany ST sprężarki śrubowej na bazie trendu

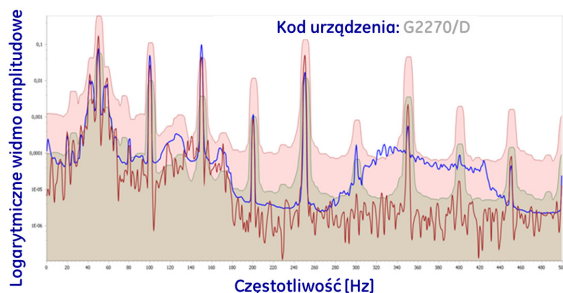
Koszty przeprowadzonych działań służb UR będących konsekwencją naprawy silnika oraz przeprowadzonej przy okazji prewencyjnej wymiany łożysk sprężarki wyniosły ~26 k\$. Natomiast oszacowanie hipotetycznych kosztów, które mogły zostać poniesione w konsekwencji niespodziewanej awarii i wymuszonego reakcyjnego UR (w oparciu o najbardziej niekorzystny scenariusz) dawało kwotę 365 k\$, a więc kilkunastokrotnie większą od kosztów poniesionych.



Rys. 6. Uszkodzone łożysko silnika oraz zanieczyszczone uzwojenia stojana

W kolejnym przykładzie zaprezentowano dane dotyczące agregatu pompowego pracującego w obwodzie wody chłodzącej chłodni.

W tym przypadku system iMCM/AES wygenerował alarm w konsekwencji turbulizacji przepływu, co w analizie widmowej (vide Rys. 7 – analiza wykonana w paśmie do 500 Hz) jest widoczne jako podniesienie poziomu drgań dla składowych widma o częstotliwości powyżej 300 Hz – krzywa niebieska. Na rysunku dodatkowo są pokazane: (i) krzywa czerwona prezentująca *widmo reprezentatywne* (wybrane arbitralnie z danych historycznych) dla pompy pracującej poprawnie, (ii) widmo szare – będące *widmem normalnym* wygenerowanym w sposób statystyczny dla danych zgromadzonych w czasie domniemanej poprawnej pracy agregatu oraz widmo czerwone będące *widmem granicznym*, którego przekroczenie wskazuje na stan nienormalny wygenerowanym jako post-processing *widma normalnego*.



Rys. 7. Indykacja zmiany ST pompy na bazie analizy widmowej

W opisywanym przypadku zostało fragmentarycznie i nieznacznie przekroczone *widmo graniczne*. Po zatrzymaniu pompy, stwierdzono zanieczyszczenia filtra po stronie ssania (vide Rys. 8). Zanieczyszczenia powodowały zmniejszenie ciśnienia ssania i w konsekwencji pojawienie się kawitacji na wirniku pompy.



Rys. 8. Zanieczyszczenia w filtrze na ssaniu pompy

Poprawienie drożności filtra spowodowało poprawę w działaniu pompy i powrót omawianego symptomu ST do analizy widmowej pokazanej na Rys. 7 – w postaci krzywej czerwonej.

## 6. Zakończenie

W ramach Internetu przemysłowego istnieje łatwa możliwość zainstalowania specjalizowanego i inteligentnego oprogramowania umożliwiającego na bazie dynamicznych przebiegów czasowych wielkości elektrycznych rozpoznawanie anomalii pracy agregatów w podobnym zakresie, jak było to dotychczas możliwe z pomocą sprzętowego monitorowania anomalii z pomocą monitorów AnomAlert – indywidualnie dla każdego agregatu.

Przeprowadzone testy udokumentowały poprawność i efektywność działania opracowanego systemu iMCM/AES.

Opracowany system nie narusza bezpieczeństwa cybernetycznego wykorzystywanej sieci przemysłowej i może być wdrożony bez zaburzania pracy innych realizowanych z jej pomocą funkcjonalności.

## Literatura

- [1]. Nowicki R.: Nadzór stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi - wprowadzenie do tematyki, Napędy i Sterowanie Nr 10, Październik 2013, ISSN1507-7764, str. 114-125.
- [2]. R. Nowicki: Zróżnicowanie systemów On-Line nadzoru stanu technicznego agregatów z napędami

elektrycznymi, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 89/2011 str. 65-73.

[3]. Nowicki R.: Klasyczne metody nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi, *Napędy i Sterowanie* Nr 11, Listopad 2013, str. 32-43.

[4]. Song J., Nowicki R., Duyar A.: Zastosowanie modelowania diagnostycznego dla wspomagania predykcijnego utrzymania ruchu i zwiększenia efektywności energetycznej w hucie, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2013 (99), str. 233-240.

[5]. Song J., Nowicki R., Duyar A.: Sprzętowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi, *Napędy i Sterowanie* Nr 1, Styczeń 2014, str. 96-106.

[6]. Taylor J.K.: Announcing the TDISecure Communication Processor, *ORBIT* Vol. 33, 2013 No. 4 p. 5-6.

[7]. Hatch Ch. T., Kuzkaya C.: AnomAlert Motor Anomaly Detector - Under the Hood, *ORBIT* Vol. 32, 2012 No. 2 p. 10-17.

[8]. Industrial Internet 101, *ORBIT* Vol. 33, 2013 No. 4 p. 21-24.

[9]. Bilgin E., Ozdemir H., Civelek Y., Önel I., Duyar A.: Use of Industrial Big Data for “No Unplanned Downtime” at Tupras Refinery (...), *Austorque Machines 2014*, Sydney Australia.

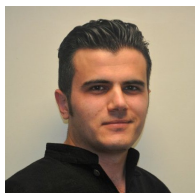
### Autorzy



Prof. Dr. Ahmet Duyar  
Ahmet.Duyar@artesis.com  
Artesis  
GOSB Teknoparki, Hightech  
Binasi, Kat 3/B 10, Gebze  
41480 Kocaeli / Turcja  
(+90) 262 678 8860



Dr inż. Ryszard Nowicki  
GE POWER CONTROLS,  
Oddział Bently Nevada;  
60-432 Poznań,  
Myśliborska 62, Polska  
Ryszard.Nowicki@ge.com  
(+48) 601 710 700



Dr. Omer F. Eker  
Omer.Eker@artesis.com  
Artesis Technology Systems  
AS, adres j.w.  
(+90) 262 678 8853