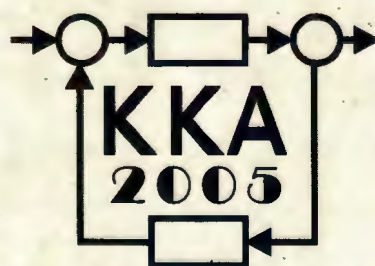


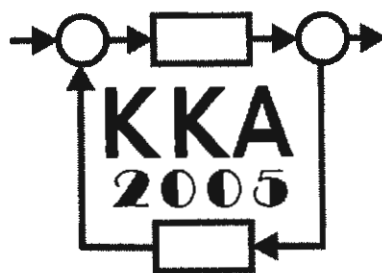
XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom III



**Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk**

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom III



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWski
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

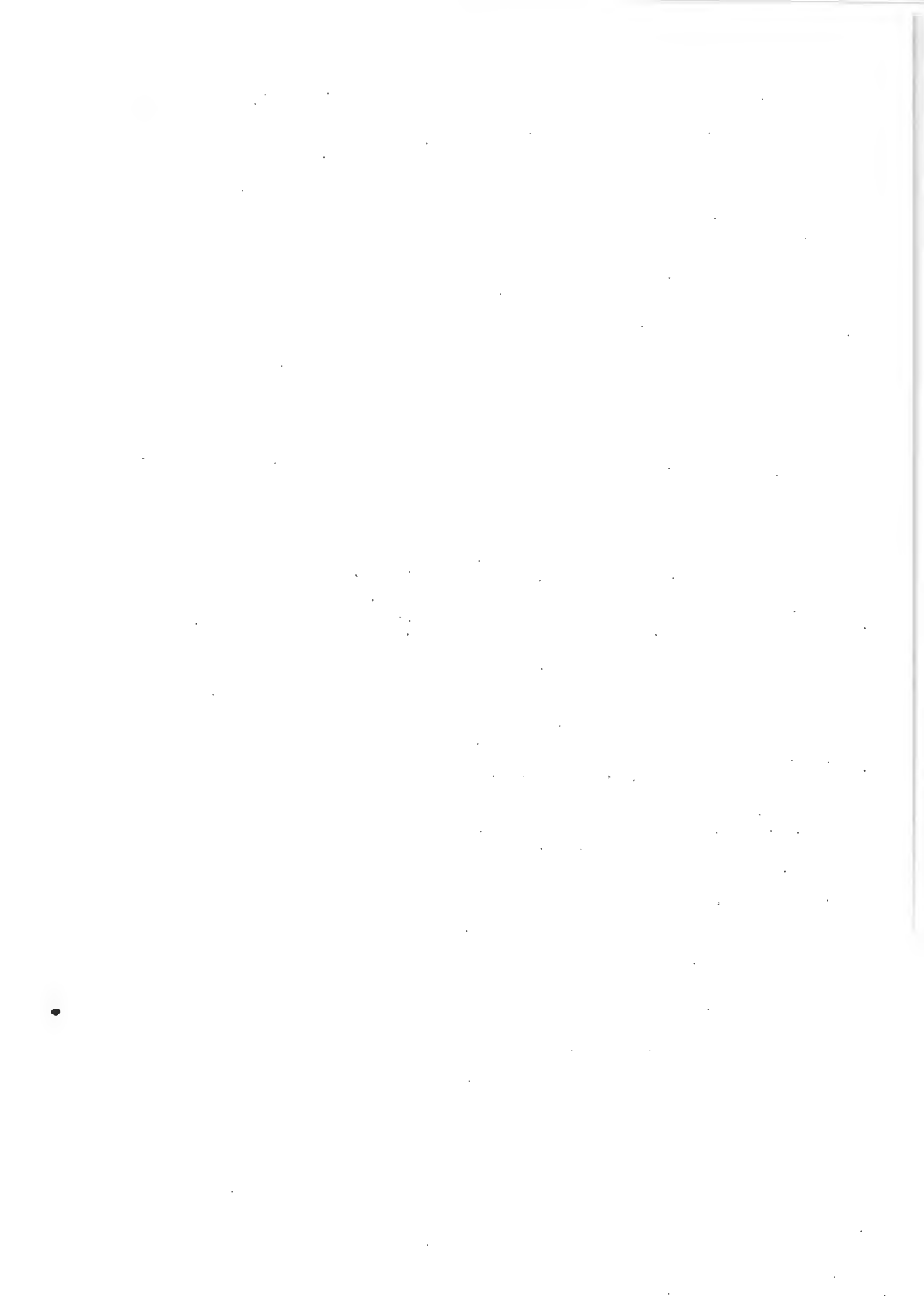
KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

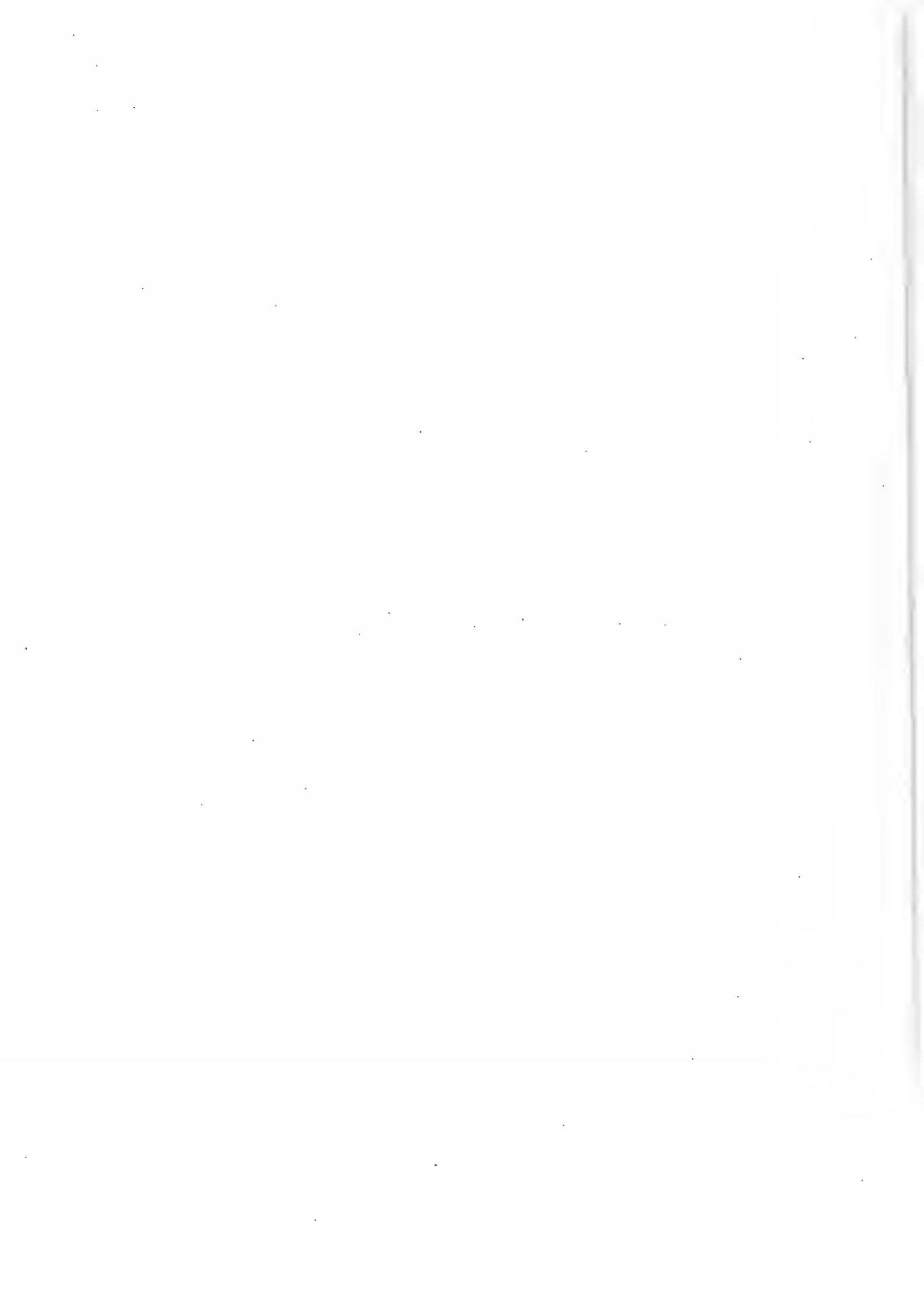
ISBN 83-89475-02-2

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa



ZASTOSOWANIA NIETECHNICZNE



STRUKTURA RYNKOWYCH MECHANIZMÓW CZASU RZECZYWISTEGO W SYSTEMACH ROZPROSZONYCH[†]

Kamil SMOLIRA, Eugeniusz TOCZYŁOWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Elektrotechniki i Technik Informatycznych
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa,
e-mail: K.Smolira@elka.pw.edu.pl, E.Toczyłowski@ia.pw.edu.pl

Streszczenie: W niniejszej pracy rozważone zostały problemy projektowania mechanizmów rynkowych czasu rzeczywistego wspomagających procesy sterowania w systemach rozproszonych. W pierwszej części pracy przedstawiono ogólne potrzeby i wymagania dotyczące tego segmentu rynku, zaś w drugiej części szczegółowy projekt takiego systemu dla rynku energii elektrycznej. Omówione zostało zagadnienie właściwego umiejscowienia procesów czasu rzeczywistego spośród pozostałych procesów planowania i regulacji, przedstawiono matematyczny model jego bilansowania oraz podano sposób efektywnego znajdowania rozwiązań. Przedstawiono także uzyskane wyniki eksperymentów obliczeniowych.

Słowa kluczowe: rynki czasu rzeczywistego, bilansowanie rynku, programowanie liniowe, rynek energii elektrycznej.

1. WSTĘP

W zarządzaniu procesami wielu złożonych systemów rozproszonych, takich jak systemy elektroenergetyczne, telekomunikacyjne, sieci komputerowe, pojawiają się ostatnio tendencje do wzbogacania stosowanych dotychczas procedur sterowania o mechanizmy rynkowe. Szczególnie duże zmiany w tym zakresie można zaobserwować między innymi w sektorze elektroenergetycznym. W większości krajów do procedur sterowania procesami równoważenia chwilowego zapotrzebowania na energię i moc elektryczną wprowadzane są konkurencyjne mechanizmy rynkowe. Wykorzystuje się w tym celu procesy obrotu energią oraz bilansowania różnorodnych usług systemowych, takich jak usługi regulacyjne, przesyłowe, itp. Wprowadzenie mechanizmów rynkowych do procedur sterowania pozwala na zwiększenie wpływu uczestników na ostateczny kształt wymiany w systemie oraz skłania do inwestycji w celu zwiększenia własnej konkurencyjności.

Ze względu na specyfikę rozproszonych systemów działających w czasie rzeczywistym oprócz typowych segmentów rynkowych: rynków długo- i średnioterminowych, rynku dnia następnego (day-ahead markets), bądź rynków dnia bieżącego (intra-day markets), wymagane jest również zastosowanie rynkowych mechanizmów działających bezpośrednio w fazie realizacji kontraktów.

Konieczność ta wynika z faktu, że we wcześniejszych fazach bilansowania rynku nie można dokładnie przewidzieć zapotrzebowania na niektóre towary i usługi. Można się wtedy posługiwać jedynie prognozami, które mogą się różnić od rzeczywistych realizacji. Dodatkowo bieżący stan systemu może się zmienić np. w skutek awarii bądź innych trudnych do przewidzenia zdarzeń. W przypadku zaprojektowania kompletnego systemu rynkowego, reakcja na takie zdarzenia powinna uwzględniać przesłanki rynkowe, a nie wyłącznie czynniki techniczne. Wymaga to stworzenia ostatniego, krytycznego segmentu rynku – tzw. *rynku czasu rzeczywistego* (ang. real-time market), na którym jest realizowane tzw. jądro bilansowania w czasie rzeczywistym, zapewniające utrzymywanie efektywnych i bezpiecznych stanów systemu we wszystkich chwilowych sytuacjach i zdarzeniach, które mogą zaistnieć podczas jego typowego działania. W mechanizmach rynków czasu rzeczywistego nie uwzględnia się sytuacji katastrof, do radzenia sobie z którymi potrzebne są osobne mechanizmy zazwyczaj o charakterze regulacyjnym a nie rynkowym.

2. CHARAKTERYSTYKA RYNKÓW CZASU RZECZYWISTEGO

Specyfika rynków czasu rzeczywistego (RCR) wymusza zastosowanie na nich nietypowych rozwiązań różniących się od mechanizmów powszechnie stosowanych na innych segmentach wolnego rynku. Ważnym czynnikiem są wysokie wymagania dotyczące bezpieczeństwa, które powodują, że nie można do końca zrezygnować z regulacji na rzecz niczym nieograniczonego, swobodnego rynku. Dlatego spotykane rozwiązania są zazwyczaj próbą znalezienia równowagi pomiędzy swobodnym rynkiem a sterowaniem. Oprócz wymogów na bezpieczeństwo w rozważanych systemach występują liczne i silne ograniczenia związane z infrastrukturą oraz ograniczoną dostępnością zasobów, co powoduje, że nie można skonstruować mechanizmów rynku czasu rzeczywistego opartych wyłącznie na prostych zasadach równowagi podaży i popytu. Występowanie ograniczeń znacznie utrudnia zarówno bilansowanie ofert kupna i sprzedaży na takim rynku jak i „sprawiedliwe” rozliczenie uczestników.

[†]praca finansowana w ramach projektu KBN 3T11C00527

Jeżeli dodatkowo weźmiemy pod uwagę fakt istnienia sztywnych limitów czasowych oraz bardzo często występującą niemożność magazynowania towarów i usług, to można łatwo stwierdzić, że właściwe zaprojektowanie mechanizmów rynku czasu rzeczywistego jest zadaniem skomplikowanym.

2.1. Umiejscowienie procesów RCR

Ponieważ rynek czasu rzeczywistego stanowi domknięcie procedur obrotu różnorodnymi towarami w systemie, wymagania w stosunku do niego zależą ściśle od sposobu działania i wyników wcześniejszych segmentów rynku. Konieczne jest więc wzajemne dopasowanie procedur rynku czasu rzeczywistego i pozostałych procesów zachodzących w systemie, aby zapewnić ich właściwą współpracę, a tym samym poprawne działanie systemu jako całości. Ze względu na liczne ograniczenia czasowe i techniczne procesów RCR, przy wzbogacaniu o nie procedur sterowania często zachodzi potrzeba jednoczesnej modyfikacji innych segmentów rynku, w celu zapewnienia ich poprawnego współdziałania.

Procesy rynku czasu rzeczywistego w przeciwieństwie do pozostałych segmentów rynku odbywają się cyklicznie, w każdym etapie elementarnym, a nie co określony czas warunkowany przez horyzont obliczeń na danym rynku. Poprzez swój repetycyjny charakter procesy RCR wymagają takiej organizacji pozostałych procedur systemu, która zapewni im wystarczający dopływ danych wejściowych. Można powiedzieć, że cykliczność procesów RCR wymusza również pewną cykliczność wcześniejszych segmentów rynku. Aby zapewnić właściwe działanie rynku dane dotyczące każdego elementarnego etapu planowania powinny przejść kolejno przez wszystkie segmenty rynku, zanim na rynku czasu rzeczywistego zostaną podjęte ostateczne decyzje. Wynika to z faktu, że ze względu na ograniczenia czasowe w trakcie procesów RCR nie jest możliwe pełne zbilansowanie systemu „od zera”. Wykonalne są jedynie drobne korekty bieżącego stanu systemu, będące reakcją na zachodzące w czasie rzeczywistym zmiany jego parametrów. Dlatego procesy rynku czasu rzeczywistego wymagają dobrych bilansów wstępnych, będących wynikami równoważenia wcześniejszych segmentów rynku. Innym ważnym powodem wymuszającym istnienie wielu następujących po sobie segmentów rynku jest fakt, że wielu decyzji nie można zostawiać na ostatnią chwilę. Muszą być one podjęte odpowiednio wcześniej ze względów technologicznych bądź dla wygody uczestników. Ponadto stopniowe bilansowanie rynku w kolejnych iteracjach ułatwia znalezienie korzystnych rozwiązań w systemach rozproszonych, gdzie autonomiczne jednostki podejmują decyzje na podstawie wyników dotychczasowych etapów rynku. Odpowiednio wcześniejsze podjęcie planowania dla przyszłych etapów podnosi również bezpieczeństwo całego systemu.

Cykliczność działania rynków czasu rzeczywistego jest zazwyczaj tak duża, że nie można przed każdym cyklem zebrać ofert od uczestników. Pociąga to za sobą konieczność zaprojektowania właściwego systemu pozyskiwania

ofert we wcześniejszych terminach. Jednym z możliwych rozwiązań jest zbieranie ofert w określonych, równych odstępach czasu i przyjęcie, że złożone przez uczestników oferty zachowują ważność przez określoną ilość kolejnych cykli RCR. Kieruje się przy tym założeniem, że wartości towarów dla uczestników nie zmieniają w tak krótkim przedziale czasu. Zbieranie ofert na rynku czasu rzeczywistego można zintegrować z pozyskiwaniem ofert na inne segmenty rynku o mniejszej częstotliwości działania, co pozwoli uczestnikom na składanie tylko jednego typu oferty przedstawiającej całość ich preferencji.

Oprócz właściwego umiejscowienia w czasie procesów bilansowania ilościowego należy również zaplanować procesy bilansowania wartościowego, czyli wyznaczania cen oraz wypłat za sprzedane towary. Terminy te nie są jednak krytyczne, bo nie mają bezpośredniego wpływu na działanie systemu. Bilansowanie wartościowe odbywa się już po fizycznej realizacji kontraktów, zatem nie musi odbywać się tak często jak bilansowanie ilościowe. Można przeprowadzać je co określoną liczbę etapów elementarnych wyceniając jednocześnie wyniki kilku kolejnych cykli bilansowania ilościowego.

2.2. Procesy RCR

Procesy rynku czasu rzeczywistego, podobnie jak w przypadku innych segmentów rynku, można podzielić na dwie główne części: bilansowanie ilościowe i bilansowanie wartościowe. Podczas bilansowania ilościowego wyznacza się, które oferty i w jakiej części zostały przyjęte do realizacji, bilansowanie wartościowe określa zaś ceny towarów wymienianych na rynku i wypłaty dla uczestników. Dla bilansowania ilościowego można wyróżnić dwa przypadki. W pierwszym bilansowanie w danym cyklu dotyczy pojedynczego, najbliższego etapu elementarnego t o długości Δt , w drugim procesy bilansowania w każdym cyklu są wieloetapowe i dotyczą wielu kolejnych etapów elementarnych od t do $t + n$, gdzie n określa się jako *horyzont obliczeń*. Zastosowanie jednego z tych wariantów zależy dość silnie od specyfiki danego systemu. Duży wpływ na to ma charakter występujących w systemie ograniczeń. Jeżeli pojawiają się ograniczenia o charakterze dynamicznym łączące różne etapy elementarne, to wskazane jest zastosowanie modeli wieloetapowych, gdyż będą one dawały lepsze wyniki dzięki uwzględnieniu zależności między kolejnymi etapami i dopasowaniu do nich stanu systemu. Przy użyciu modelu jednoetapowego planowanie również będzie możliwe, jednak optymalizacja będzie miała tylko charakter lokalny dla najbliższego etapu i nie będzie uwzględniała ewentualnego wpływu podjętych decyzji na przyszłe etapy. W takiej sytuacji mogą się pojawić gwałtowne zmiany stanu systemu pomiędzy kolejnymi etapami, które zazwyczaj uznaje się za niekorzystne. W przypadku, gdy nie ma ograniczeń wiążących różne etapy planowania w procesach RCR można rozważać pojedyncze etapy. Jednak nawet wtedy planowanie na dłuższym horyzoncie ma pewne zalety, daje one informacje na temat przewidywanego zachowania systemu w najbliższej przyszłości, co może być użyteczną informacją dla uczestników i operatora ryn-

ku oraz zwiększa bezpieczeństwo pomagając wykrywać wcześniej niepożądane sytuacje.

Ogólny model bilansowania ilościowego rynku czasu rzeczywistego z ograniczeniami można przedstawić za pomocą następującego zadania programowania liniowego:

$$\max_{d,p} [Q = \sum_{t \in T} (\sum_{m \in B} e_{mt} d_{mt} - \sum_{l \in S} s_{lt} p_{lt})] \quad (1)$$

$$\sum_{m \in B} d_{mt} \leq \sum_{l \in S} p_{lt} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$d_{mt}^{\min} \leq d_{mt} \leq d_{mt}^{\max} \quad \forall m \in B, t \in T \quad (3)$$

$$p_{lt}^{\min} \leq p_{lt} \leq p_{lt}^{\max} \quad \forall l \in S, t \in T \quad (4)$$

$$(d, p) \in DP^0 \quad (5)$$

d_{mt} – zmienna określająca ilość zakupionego towaru według m -tej oferty kupna na etap t

p_{lt} – zmienna określająca ilość sprzedanego towaru według l -tej oferty sprzedaży na etap t

e_{mt} – cena ofertowa kupna dla oferty m na etap t

s_{lt} – cena ofertowa sprzedaży dla oferty l na etap t

d_{mt}^{\max} – maksymalny wolumen w ofercie m na etap t

p_{lt}^{\max} – maksymalny wolumen w ofercie l na etap t

DP^0 – zbiór dopuszczalnych wartości d i p

Jest to wersja wieloetapowa modelu. W wersji jednoetapowej można zrezygnować z indeksu t , albo przyjęc zbiór T jako jednoelementowy. W funkcji celu maksymalizowany jest dobrobyt ekonomiczny Q określający sumaryczne korzyści wynikający z zawartych na rynku transakcji. Ograniczenie (2) zapewnia bilans pomiędzy przyjętymi ofertami kupna d i sprzedaży p . Ograniczenia (3) i (4) ograniczają maksymalną i minimalną realizację ofert do wartości zgłoszonych przez składających je uczestników. Ograniczenie (5) reprezentuje w sposób zagregowany wszystkie ograniczenia występujące w systemie. Na na rynku czasu rzeczywistego zazwyczaj nie rozpatruje się decyzji o przyjęciu bądź odrzuceniu ofert o ograniczonej elastyczności¹, gdyż wymagałoby to wprowadzenia zmiennych binarnych, co z kolei spowoduje znaczne wydłużenie czasu rozwiązywania modelu, uniemożliwiając bilansowanie w czasie rzeczywistym. Rozpatruje się więc wyłącznie korekty ofert przyjętych do realizacji na wcześniejszych segmentach rynku, w dopuszczalnym zakresie elastyczności. Z tego powodu na wcześniejszych segmentach rynku należy zadbać o taki dobór przyjętych ofert, aby przy ich pomocy możliwe było zbilansowanie systemu w zmiennych warunkach. Osiąga się to zazwyczaj poprzez mechanizm rezerw, zapewniający możliwość zbilansowania przy wszystkich przewidywanych w najbliższej przyszłości stanach systemu. W sytuacji zaistnienia nagłych i nieprzewidzianych zmian, które uniemożliwią zbilansowanie systemu przy pomocy wcześniej przyjętej puli ofert konieczne będzie uruchomienie procedur awaryjnych, które pozwolą na jej zmianę. Ze względu na możliwy czas działania takich procedur i ewentualne ograniczenia techniczne, pożądane jest wykrywanie takich sytuacji z odpowiednio dużym wy-

¹Oferty które muszą zostać przyjęte z pewnym minimalnym wolumenem d_m^{\min}/p_l^{\min} , bądź odrzucone w całości.

przedzeniem, w czym może pomóc między innymi wieloetapowe planowanie na rynku czasu rzeczywistego.

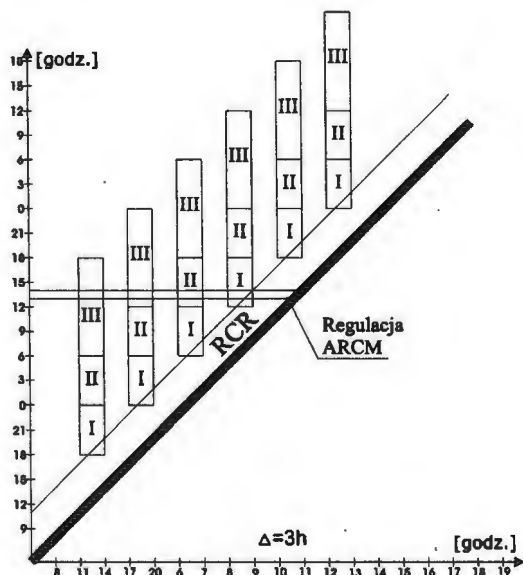
Występowanie w systemie ograniczeń (5) powoduje, że oferty nie są przyjmowane wyłącznie na podstawie konkurencyjności ich ceny. W wyniku tego często dochodzi do sytuacji, w której oferty konkurencyjne są odrzucone, lub realizowane tylko w części, zaś zamiast nich przyjmowane są oferty niekonkurencyjne. Komplikuje to znacznie bilansowanie wartościowe. Należy podczas niego wyznaczyć rekompensaty za odrzucone konkurencyjne oferty oraz rozliczyć wymuszone do przyjęcia oferty niekonkurencyjne po cenie ofertowej, a nie rynkowej. Ważnym aspektem jest również rozdzielenie pomiędzy uczestników kosztów ograniczeń, które powodują zmniejszenie wypracowywanego dobrobytu Q . Część ograniczeń uznawana jest jako *systemowe* i dzielona solidarnie pomiędzy uczestników rynku. Natomiast pozostałe nazywane są *grupowymi*, a ich koszty alokowane są pomiędzy ich sprawców. Bardzo ważne jest właściwe określenie sprawców ograniczeń, ponieważ w przeciwnym wypadku będzie istniała zachęta do wprowadzania sztucznych ograniczeń, które wymuszą przyjęcie niekonkurencyjnych ofert albo zagwarantują otrzymanie rekompensaty, a za wprowadzenie których sprawcy nie zostaną obciążeni.

3. RYNEK CZASU RZECZYWISTEGO ENERGII

W niniejszym punkcie zostanie przedstawiony szczegółowy projekt implementacji segmentu rynku czasu rzeczywistego na rynku energii elektrycznej. Energia elektryczna jest bardzo specyficznym towarem. Oprócz zmiennej w czasie prognozy zapotrzebowania i braku możliwości magazynowania dochodzą jeszcze bardzo skomplikowane ograniczenia techniczne bloków wytwórczych i sieci przesyłowej, niemożność określenia od kogo pochodzi towar pobierany z sieci i jaką drogą został przetransportowany oraz ostre warunki bezpieczeństwa i stabilności dostaw.

3.1. Struktura

Tak jak wspomniano wcześniej rynek czasu rzeczywistego wymaga dobrze zorganizowanej i dopasowanej struktury pozostałych procesów systemu. W przypadku energii elektrycznej nabiera to specjalnego znaczenia ze względu na duże wymagania dotyczące bezpieczeństwa dostaw oraz powolną dynamikę rozruchu bloków cieplnych elektrowni. Decyzje o rozruchu należy podjąć często na 8 godzin wcześniej, co oznacza, że z takim wyprzedzeniem należy ustalić skład pracujących jednostek, czyli zdecydować o przyjęciu bądź odrzuceniu ofert o ograniczonej elastyczności, jakimi jest większość ofert generacji energii. Na rys. 1 przedstawiona została propozycja umiejscowienia procesów rynku bilansującego oraz wcześniejszych segmentów rynku. Procesy oznaczone zostały jako prostokąty. Na osi poziomej oznaczony został czas w jakim realizowane są kolejne procesy, zaś na pionowej ich horyzont obliczeń. Procesy rynku czasu rzeczywistego oznaczone zostały jako wstęga z napisem RCR.



Rysunek 1. Schemat procesów RCR i procesów wcześniejszych segmentów rynku.

W rzeczywistości nie jest to proces ciągły, tylko seria cyklicznych procesów uruchamianych regularnie co etap (w przykładowym rozwiązaniu 15 minut). Jednak takie przedstawienie graficzne jest bardziej przejrzyste. Każdy proces rynku czasu rzeczywistego obejmuje horyzontem obliczeń 6 godzin, czyli 24 etapy 15-minutowe. Wyniki dla pierwszego etapu w horyzoncie obliczeń stają się wiążące, gdyż przechodzi on do fazy realizacji, w której jedyny wpływ na stan systemu mają układy regulacji automatycznej ARCM. Wyniki dla dalszych etapów mogą zostać jeszcze zmienione w kolejnych cyklach RCR, jednak wcześniejsze obliczenia dla nich są konieczne, ze względu na istnienie ograniczeń wiążących sąsiednie etapy oraz ze względów bezpieczeństwa. Procesy poprzedzające rynek czasu rzeczywistego przedstawione na rys. 1 można traktować jako rynek dnia bieżącego (RDB). Odbywa się on co 6 godzin i obejmuje horyzontem obliczeń całą dobę. Horyzont procesów RDB został podzielony na trzy fazy, oznaczone jako I, II i III. Planowanie dla wszystkich faz odbywa się równoległe, ma jednak różny charakter. Zróznicowanie to wynika przede wszystkim z różnych potrzeb i możliwości planowania w zależności od czasu jaki pozostał do fazy realizacji oraz z chęci bilansowania systemu w drodze kolejnych interakcji pomiędzy operatorem a uczestnikami rynku. W rozproszonych systemach, gdzie działa wiele autonomicznych podmiotów takie podejście daje lepsze rezultaty niż jednokrotna optymalizacja globalna, gdyż pozwala uczestnikom na podstawie wyników kolejnych faz na zorientowanie się jakie są potrzeby operatora i bieżąca sytuacja na rynku. Ponadto w sytuacji częściowego nachodzenia na siebie horyzontów kolejnych cykli RDB można łatwo odzielić etapy dla których następują ostateczne obliczenia od tych, dla których wyniki będą jeszcze modyfikowane przez kolejne procesy RDB.

W Fazie III najbardziej oddalonej od fazy realizacji następuje wstępna ocena zgłaszanych przez uczestników programów pracy oraz wstępne określenie

przyjętych ofert (wybór składu pracujących jednostek) i stopnia ich realizacji (rozdział obciążeń). Faza III jako jedyna ma 12-godzinny horyzont planowania, więc w cyklu 6-godzinny każdy elementarny etap planowania poddawany jest dwukrotnemu bilansowaniu w tej fazie.

Faza II obejmuje horyzontem obliczeń blok sześciu godzin, stanowiący pierwszą połowę horyzontu planowania realizowanej przed nią Fazy III. Ze względu na powolną dynamikę rozruchu jednostek wytwórczych, jest to ostatni okres, w którym są ustalane polecenia rozruchowe, zatem skład jednostek z tej fazy staje się wiążący dla dalszych procesów.

Faza I jest ostatnim procesem planowania, tuż przed rozpoczęciem RCR. Dokonywane są w niej ostateczne korekty programów jednostek, przy ich ustalonym składzie oraz ustalonej alokacji rezerw szybkich. Następuje również rozbiecie stopnia dyskretyzacji programów pracy z okresów godzinnych na 5-cio lub 15-minutowe. Wyniki Fazy I są bezpośrednio danymi wejściowymi dla procesów RCR.

Na rys. 1 przedstawiony został przebieg procesów dla wybranej godziny. Widać przejście przez kolejne fazy planowania: dwukrotnie Faza III, Faza II, Faza I, a następnie faza RCR oraz faza regulacji ARCM. Oczywiście na rynku energii istnieją również wcześniejsze rynki średnio- i długoterminowe. Na rys. 1 pojawiłyby się one jako prostokąty o dłuższym horyzoncie planowania, czyli wyższe niż procesy RDB, za to pojawiające się rzadziej.

3.2. Model bilansowania ilościowego

W każdym cyklu k rynku czasu rzeczywistego, na podstawie obecnej sytuacji w systemie, wyników planowych segmentów rynku oraz ofert złożonych przez uczestników dokonuje się ostatecznego bilansowania. Poniżej została przedstawiona możliwa do wykorzystania w tym celu modelu programowania liniowego.

$$\min \left[\sum_h \sum_j K_j(p_{jh}^{(k)}) \right] \quad (6)$$

$$\sum_j p_{jh}^{(k)} \geq D_h^{(k)} \quad \forall h \in H \quad (7)$$

$$p_{jh}^{\min} \leq p_{jh}^{(k)} \leq p_{jh}^{\max} \quad \forall j \in J, h \in H \quad (8)$$

$$-r_j^- \leq p_{j,h}^{(k)} - p_{j,h-1}^{(k)} \leq r_j^+ \quad \forall j \in J, h \in H \quad (9)$$

$$\sum_j w_{ij} p_{jh}^{(k)} \leq P_i^{\max} \quad \forall h \in H, i \in E \quad (10)$$

$p_{jh}^{(k)}$ – moc jednostki j w etapie h (w cyklu k -tym)

K_j – koszt wynikający z przyjęcia ofert bilansujących zgłaszanych przez jednostkę j

$D_h^{(k)}$ – prognoza zapotrzebowania na energię w etapie h

p_{jh}^{\max} – maksymalna moc jednostki j w etapie h

p_{jh}^{\min} – minimalna moc jednostki j w etapie h

r_j^+ – maksymalny przyrost mocy jednostki j

r_j^- – maksymalne obniżenie mocy jednostki j

P_i^{\max} – maksymalne obciążenie linii przesyłowej i .

Prezentowany model jest jednostronny, pojawiają się tylko oferty sprzedaży energii – $p_{jh}^{(k)}$, podczas gdy popyt jest w warunku bilansu (7) reprezentowany przez zagręgowaną prognozę zapotrzebowania – $D_h^{(k)}$. Jest to zgodne z obecną sytuacją na polskim rynku energii, gdzie stroną aktywną są wyłącznie dostawcy [1]. Ograniczenie (8) odpowiada za utrzymanie generacji jednostki wytwórczej j pomiędzy dopuszczalnym minimum a maksimum. Wartości te wynikają z ograniczeń technicznych oraz rozstrzygnięć wcześniejszych segmentów rynku. Jeżeli jednostka została wyznaczona do pracy w regulacji, to zakres elastyczności jej oferty zmniejsza się o pasma rezerw szybkich. Jeżeli jednostka w części etapów nie pracuje, to wartości obu stron wynoszą 0. Ograniczenie (9) ustala maksymalne zmiany generacji jednostki pomiędzy etapami zarówno w górę jak i w dół. Jest to jedyne ograniczenie wiążące różne etapy planowania i niepozwalające na dekompozycję zadania. Nie można go jednak pominąć, ponieważ większość jednostek wytwórczych nie jest w stanie w ciągu jednego etapu zmienić swojej generacji w całym zakresie elastyczności. Ograniczenie (10) odpowiada za dopuszczalną przepustowość sieci przesyłowych. Wykorzystuje się w nim linearyzację wokół aktualnego punktu pracy systemu. Elementy macierzy w_{ij} określają jaki wpływ ma zmiana generacji jednostki j na przepływ energii linią i . Jest to oczywiście przybliżenie liniowe, ale przy niewielkich zmianach stanu systemu, jakie w założeniu powinny mieć miejsce na rynku czasu rzeczywistego sprawdza się dość dobrze. Istnieje możliwość stworzenia bardziej skomplikowanego modelu wyznaczającego dokładniej przepływy w sieci, jego propozycja została przedstawiona w [3]. Występujący w funkcji celu (6) koszt przyjęcia przez jednostkę j programu $p_{jh}^{(k)}$, wynika z dotychczasowego punktu pracy tej jednostki oraz złożonych dla niej przyrostowo–redukcyjnych ofert bilansujących. Przy założeniu schodkowej postaci ofert na energię bilansującą funkcja $K_j(p_{jh}^{(k)})$ staje się funkcją wypukłą przedziałami liniową, zatem całość problemu da się łatwo zapisać w postaci zadania programowania liniowego.

Podczas rozwiązywania w kolejnych 15-minutowych cyklach przedstawionego powyżej zadania programowania liniowego można wykorzystać fakt, że kolejne zadania różnią się tylko nieznacznie od siebie. Z powodu przesunięcia horyzontu obliczeń o jeden etap zmienne i parametry dotyczące najbliższej chwili czasowej są usuwane i zastępowane przez dotyczące etapu następującego po dotychczasowym ostatnim. Jeżeli dokonamy zmiany nazw wierszy i kolumn macierzy sympleksowej przesuując je o jeden etap w czasie ($h = h + 1$), to w bieżącym cyklu otrzymamy zadanie o strukturze macierzy współczynników identycznej z zadaniem z poprzedniego cyklu, różniące się jedynie nazwami kolumn i wierszy oraz wartością części prawych stron. Przy rozwiązywaniu zadania za pomocą dualnej metody sympleks pozwoli to na wykorzystanie bazy z rozwiązania poprzedniego zadania jako punktu startowego. Jeżeli zmieniają się tylko wartości prawych stron, a zmianie nie ulegają współczynniki macierzy oraz wektor cen, to poprzednie rozwiązanie pozostanie dualnie dopuszczalne stając się co najwyżej nie-

optymalnym. Pozwoli to na znalezienie rozwiązania zadania z bieżącego cyklu w znacznie mniejszej ilości iteracji metody sympleks, niż gdyby zaczynało się za każdym razem rozwiązywanie od początku. W tabeli 1 przedstawiono czas uzyskania wyników dla implementacji przedstawionego powyżej modelu w zależności od horyzontu obliczeń. Badano średnie czasy jednokrotnego rozwiązania modelu oraz rozwiązywania w sposób cykliczny opisany powyżej. Obliczenia zostały przeprowadzone przy pomocy pakietu CPLEX 6.5 na komputerze wyposażonym w procesor PIII 700 i 256 MB RAM dla danych historycznych i sieci o rozmiarach rzeczywistych.

Tabela 1. Czas uzyskania wyników.

horyzont	4	8	10	12	17	20
jed.[s]	1.15	2.47	3.34	4.08	6.15	7.68
cykl.[s]	0.32	0.50	0.61	0.69	0.75	0.85

3.3. Bilansowanie wartościowe

Jak to zostało wspomniane wcześniej, ze względu na obecność w systemie ograniczeń wyznaczenie cen towarów i wypłat dla uczestników wymaga rozwiązania zadania bilansowania wartościowego. Jednym z podstawowych kroków jest wyróżnienie towarów i usług jakimi obraca się na rynku czasu rzeczywistego. Model (6) - (10) można potraktować jako model obrotu nośnika wielu towarów. Pojawiają się następujące grupy towarów związane z kolejnymi ograniczeniami:

- energia etapie h , ograniczenie (7) w ilości H
- dopuszczalna moc jednostki j w etapie h , ograniczenie (8), w ilości $J * H$
- zmiana mocy jednostki j między etapami h i $h + 1$, ograniczenie (9), w ilości $J * (H - 1)$
- przesył energii linią l w etapie h , ograniczenie (10), w ilości $L * H$

Z każdym ograniczeniem występującym w zadaniu bilansowania związana jest odpowiadająca mu zmienna z zadania dualnego. Te zmienne dualne będziemy oznaczać poprzez λ z indeksem odpowiadającym prawej stronie ograniczenia, czyli np. $\lambda_{p_{jh}}$. Wartości zmiennych dualnych można traktować jako koszt ograniczeń-towarów, gdyż są one pochodną funkcji celu względem zmian wartości prawych stron ograniczeń aktywnych [4]. W standardowej postaci zadania programowania liniowego przy minimalizacji występują nierówności typu \geq , w przedstawionym modelu pojawiają się nierówności dwustronne oraz typu \leq , zatem: $\lambda_{p_{jh}^{max}}$ będzie miało wartości ≤ 0 , $\lambda_{p_{jh}}$ będzie miało wartości dodatnie przy aktywnym ograniczeniu na moc minimalną, zaś ujemne przy aktywnym ograniczeniu na moc maksymalną, podobnie $\lambda_{r_{jh}}$ będzie miało wartości dodatnie dla aktywnego ograniczenia na zmianę mocy w dół i ujemne dla ograniczenia zmiany mocy w górę.

Należy pamiętać, że wartość tej pochodnej jest prawdziwa tylko lokalnie, dla pewnego otoczenia danej wartości prawej strony ograniczenia, do czasu zmiany bazy. W

momencie zmiany bazy, a zatem również w punkcie będącym rozwiązaniem optymalnym, wartość λ może być niejednoznaczna. Mimo to można podjąć próbę bezpośredniego wykorzystania zmiennych dualnych do wyceny towarów na rynku czasu rzeczywistego. Dokładne wyznaczenie kosztów ograniczeń jest zagadnieniem skomplikowanym, metody jego przeprowadzenia ze szczególnym uwzględnieniem rynku energii można znaleźć w [2].

Sprzedaż energii przez uczestników rynku jest zawsze skojarzona z obrotem występującymi na nim usługami. Z analizy modelu (6) - (10) wynika, że sprzedaż przez wytwórcę j jednostki energii w etapie h pociąga za sobą:

- sprzedaż jednostki usługi dopuszczalnej mocy,
- sprzedaż jednostki usługi zmiany mocy (rampy) pomiędzy etapami $h - 1$ i h ,
- kupno jednostki usługi zmiany mocy (rampy) pomiędzy etapami h i $h + 1$,
- sprzedaż w_{ij} jednostek przesyłu energii linią i (dla każdej linii, dla której $w_{ij} > 0$). W przypadku gdy $w_{ij} < 0$, mamy do czynienia z kupnem usługi, co oznacza, że generacja p_{jh} ułatwia przesył linią i (należy pamiętać, że $\lambda_{P_i^{max}} \leq 0$).

Wykorzystując zawartość towarów w jednostce nośnika można w następujący sposób wyznaczyć cenę sprzedaży energii dla danej jednostki w danej godzinie.

$$\pi_{jh}^s = \lambda_{D_h} + \lambda_{p_{jh}} + \lambda_{r_{j,h-1}} - \lambda_{r_{j,h}} + \sum_i w_{ij} \lambda_{P_i^{max}} \quad (11)$$

Takie wyznaczanie ceny gwarantuje, że wszystkie oferty przyjęte do realizacji zostaną rozliczone po cenie ofertowej. W przypadku nieuwzględnienia przy wyznaczaniu ceny ograniczeń poza bilansem, wszystkie oferty zostaną rozliczone po jednolitej cenie rynkowej. Oba przypadki nie są korzystne ponieważ pierwszy z nich skłania do spekulacji własną ceną ofertową, zaś w drugim w skutek wymuszeń mogą zostać przyjęte oferty o cenie sprzedaży wyższej niż wyznaczona do rozliczeń cena rynkowa. Rezygnacja z uwzględniania w cenie części ograniczeń jest rozwiązaniem pośrednim, typowo można nie rozliczać ograniczenia na oferowaną moc maksymalną. W takim wypadku oferty, które nie uczestniczą w aktywnych ograniczeniach rampy i przesyłowych będą rozliczane po jednolitej cenie rynkowej, natomiast pozostałe oferty będą miały obniżoną lub podwyższoną cenę w skutek konieczności zakupu lub sprzedaży pewnych usług. Żadne z tych podejść nie gwarantuje jednak właściwego podziału dobrobytu, aby wyznaczyć sprawiedliwe wypłaty dla uczestników rynku należy wykorzystując wycenę towarów i usług przeprowadzić bilansowanie wartościowe. Zastosowane modele powinny uwzględniać wymuszone przyjmowanie i odrzucanie ofert oraz poprawnie alokować koszty ograniczeń, dokonujące podziału wypracowanego dobrobytu pomiędzy uczestników rynku. Modele takie zostały przedstawione w [5].

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych rozważań, można dość dokładnie określić jakie wymagania muszą spełniać mechanizmy rynków czasu rzeczywistego oraz co wnoszą one do systemu. Przedstawiony rynek czasu rzeczywistego energii elektrycznej stanowi dobrą praktyczną ilustrację rozważanych wcześniej zagadnień. Spełnia on wszystkie podstawowe wymagania stawiane takim systemom i stanowi dobry punkt startowy do dalszych badań i eksperymentów. Podstawowymi kierunkami rozwoju prezentowanego systemu powinno być wprowadzenie ofert wielotowarowych [5] oraz rozwój mechanizmów bilansowania wartościowego.

STRUCTURE OF REAL TIME MARKET MECHANISMS IN DISTRIBUTED SYSTEMS

Abstract: In this paper we consider the problem of designing appropriate structure of the real-time market mechanisms in control of the distributed systems. In the first part we present general requirements regarding this segment of market. In the second part we present project of real-time market for the electrical energy sector. We locate the real-time market processes within other processes in the system and consider a mathematical model for RT-balancing together with efficient method of finding optimal solutions. We present also results of the numerical experiments.

Literatura

- [1] *Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej. Regulamin Rynku Bilansującego w Polsce*, Operator Systemu Przesyłowego, Warszawa, 2002.
- [2] Kaleta M.: *Wybrane modele i algorytmy optymalizacji na lokalnym rynku energii elektrycznej*. Roprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2004.
- [3] Rogulski M., Smolira K.: *Korekta programów jednostek twórczych na rynku z rozproszonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną*, *Systems* vol. 9, pp. 863-872, 2004.
- [4] Stachurski A., Wierzbicki A.P. *Podstawy Optymalizacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [5] Toczyłowski E.: *Optymalizacja procesów rynkowych przy ograniczeniach*, wydanie II zmienione i poszerzone, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2003, str. 552, <http://www.exit.pl/optymal2.htm>.
- [6] Toczyłowski E. i inni: „Propozycje modyfikacji zasad działania rynku bilansującego”, *Raport IAiS PW Nr 2003 07*, Politechnika Warszawska, wrzesień 2003.





**Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk**

ISBN 83-89475-00-6