

P. 2900/75

# MERA

KOMPUTEROWE SYSTEMY

AUTOMATYZACJI I POMIARÓW

# BIULETYN

10-11 (164-165)

Rok XIV - 1975

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

Redaktor Naczelny: mgr Roman Sprawski  
Sekretarz Redakcji: mgr Zofia Bieguszevska-Kochan  
Redaktorzy działowi: mgr Bolesław Drożak  
mgr inż. Janusz Dziewięcki  
inż. Ludomir Kowalski  
Członkowie: dr hab. Marek Greniewski  
Jan Esikowski  
mgr inż. Ludomir Krzystolik  
mgr Ewa Mańkiewicz-Cudny  
red. Tadeusz Podwysocki  
mgr inż. Tadeusz Ustaborowicz

## WARUNKI PRENUMERATY

Cena prenumeraty rocznej - 516,00 zł

Instytucje państwowe i społeczne mogą zamawiać prenumeratę wyłącznie za pośrednictwem Oddziałów i Delegatur Centrali Kolportażu Prasy i Wydawnictw RSW "Prasa-Książka-Ruch". Prenumeraty od czytelników indywidualnych przyjmują urzędy pocztowe oraz listonosze. Można również dokonać wpłat na konto PKO nr 1-6-100020 RSW "Prasa-Książka-Ruch" - CKPiW, Warszawa, ul. Towarowa 28

Indeks nr 35429/35309

# ZJEDNOCZENIE PRZEMYSŁU AUTOMATYKI I APARATURY POMIAROWEJ „MERA”



P. 2900/75

## „MERA”

**BIULETYN PRZEMYSŁU  
KOMPUTEROWYCH SYSTEMÓW  
AUTOMATYZACJI I POMIARÓW**

**WARSZAWA, PAŹDZIERNIK - LISTOPAD 1975**

## SPIS TREŚCI

### Referaty

1. J. Pollak	- Stan prac nad zagadnieniem automatyzacji elektrowni jądrowych w Polsce .....	3
2. Z. Jakubowski, T. Tomczak	- Doświadczenia zagraniczne i tendencje rozwojowe systemów automatyki elektrowni jądrowych z reaktorami wodno-ciśnieniowymi .....	8
3. S. Kisielewicz, K. Kowalski, A. Nawrocki, J. Radzio, T. Stankiewicz	- Własności dynamiczne bloku jądrowego WWER-400 uzyskane na drodze modelowania matematycznego .....	13
4. S. Knorr, J. Nieckarz	- Analiza warunków środowiskowych dla aparatury do pomiarów cieplnych i regulacji oraz przygotowanie aparatury regulacyjnej dla potrzeb elektrowni jądrowych .....	21
5. J. Korytkowski, J. Kurilec, K. Szulc	- Elementy automatyki systemu URS-III-M-INTELEKTRAN /wersja modułowa/ .....	28
6. S. Chwaszczewski	- INCORMER - Komputerowy System Pomiarów wewnętrzzdzeniowych reaktorów WWER-440 i WWER-1000 .....	31
7. S. Chwaszczewski	- Oprogramowanie systemu pomiarów wewnętrzzdzeniowych reaktorów typu WWER .....	40
8. A. Libura	- INCORMER- T - Komputerowy podsystem pomiaru temperatury wewnątrz rdzenia reaktora energetycznego .....	45
9. B. Filipiak, K. Młicki	- Koncepcja nowego systemu dozymetrycznego elektrowni jądrowej z reaktorem WWER-440 .....	48
10. A. Krzycki, A. Ostrowski, J. Jabłońska	- Badania opracowanych w IBJ elementów systemu kontroli rozruchu i przeładunku paliwa w reaktorach typu WWER i wdrożenia tego systemu w elektrowniach jądrowych .....	57

### Komunikaty

1. J. Kaniewski, P. Szulc, T. Zieliński	- SAKOR-B - System blokowej aparatury, neutronowej kontroli mocy globalnej reaktorów .....	64
2. A. Ostrowski	- Metody ilościowe badań przeciwzakłóceń reaktorowych linii kontrolno-pomiarowych .....	69
3. J. Pollak, T. Tomczak	- Układy regulacji elektrowni jądrowej z reaktorem WWER-440 .....	74
4. Z. Jakubowski, T. Tomczak	- System sterowania binarnego elektrowni z reaktorem WWER-440 .....	77
5. W. Zamojski	- Metoda analizy niezawodnościowej systemów sterowania elektrowni jądrowej i wyniki badań niezawodnościowych różnych wersji układów elektrowni jądrowej WWER-440 .....	81
6. A. Werner	- Własności dynamiczne wytwornicy przepływowej przeznaczonej dla bloku WWER-1000 .....	86

---

Redakcja i Zakład Małej Poligrafii: Dział Wydawnictw Przedsiębiorstwa Automatyki Przemysłowej "Mera-Pnefal", ul. Patriotów 77, 04-950 Warszawa. Tel. 12-41-71 /Red./ i 12-41-60 /ZMP/ Zam. 248/75. Nakład 2000 egz.

## STAN PRAC NAD ZAGADNIENIEM AUTOMATYZACJI ELEKTROWNI JĄDROWYCH W POLSCE

### 1. Wprowadzenie

Plany budowy elektrowni jądrowych w Polsce spowodowały podjęcie prac przygotowawczych m. in. w zakresie automatyzacji tych elektrowni. W ciągu ostatnich kilku lat prace te zostały znacznie zaawansowane. Świadectwem tego będą referaty i komunikaty przygotowane na konferencję. Realizacją zadań w tej dziedzinie zajmują się instytuty i przedsiębiorstwa mające doświadczenie w automatyzacji elektrowni konwencjonalnych oraz instytucje podległe Urzędowi Energii Atomowej.

Całość działalności opiera się na perspektywach wdrożeń nie tylko w krajowej energetyce jądrowej, lecz również na perspektywach kooperacyjnych dostaw do krajów RWPG w ramach organizacji RWPG - "Interatomenergo". Dotychczas w poważnym zakresie zaangażowany jest w takie dostawy krajowy przemysł ciężki, /wytwornice pary, stabilizatory ciśnienia, turbiny/.

W okresie przygotowywania referatu nie został jeszcze ustalony udział naszego kraju w produkcji urządzeń automatyki. Szeroki program budowy elektrowni jądrowych w krajach RWPG zmusza jednak do ścisłej współpracy, jedynie dzięki której można będzie zapewnić nie tylko realizację dostaw w zakresie ilościowym, ale również odpowiedni stopień nowoczesności rozwiązań, co szczególnie wyraźnie występuje w dziedzinie automatyzacji.

Aby zdać sobie sprawę z rozmiarów budownictwa elektrowni jądrowych, warto przytoczyć podstawowe dane o rozwoju energetyki jądrowej w Polsce i w innych krajach RWPG.

Obecnie moc zainstalowana elektrowni jądrowych w krajach RWPG wynosi około 6000 MW. W większości są to elektrownie z reaktorami wodno-ciśnieniowymi /reaktory

typu WWER/. W eksploatacji i w budowie znajdują się głównie bloki o mocy 440 MW. Trwają prace nad projektem bloku 1000 MW, który w najbliższym dziesięcioleciu będzie podstawową jednostką energetyki jądrowej w krajach RWPG. Plany rozwojowe przewidują zainstalowanie do roku 1983 ok. 30 bloków WWER - 440 MW, a w latach 1981 - 90 ok. 150 bloków WWER 1000 MW.

Polska jest krajem stosunkowo późno wprowadzającym do eksploatacji elektrownie jądrowe. Obecnie plany przewidują budowę do 1990 r. 4 bloków 440 MW i 4 bloków 1000 MW. Będą to bloki z reaktorami WWER. Pierwszy zostanie włączony do sieci w 1983 r. Około 1990 r. w niektórych krajach socjalistycznych elektrownie jądrowe będą pokrywały do 40% zapotrzebowania energii elektrycznej.

### 2. Specyfika zagadnień automatyzacji elektrowni jądrowych

Wysokie moce jednostkowe energetycznych bloków jądrowych, znaczne skomplikowanie i różnorodność układów technologicznych oraz wymaganie wysokiej dyspozycyjności spowodowały, że elektrownie jądrowe cechują się szerokim zakresem automatyzacji. W elektrowniach tych stosuje się rozległe i nowoczesnie zorganizowane systemy pomiarów i automatyki, połączone ze sobą w jeden wspólny system decydujący o sprawnym i niezawodnym wytwarzaniu energii.

W krajach zachodnich /RFN, Wielka Brytania, Francja/ i w Stanach Zjednoczonych przyjęto określoną "filozofię" sterowania elektrowniami jądrowymi i rozwinięto odpowiednie urządzenia i aparaturę. "Filozofia" ta polega na daleko idącej integracji poszczególnych systemów automatyki i pomiarów oraz stworzeniu systemu kierowania blokiem. Zasada ta stosowana jest również w elektrowniach

niach konwencjonalnych. Podporządkowano jej rozwój środków automatyzacji w wielu krajach, w tym również w krajach RWPG.

Wydaje się, że specyficzne wymagania elektrowni jądrowych /ilość informacji o procesie przekraczająca możliwości percepcji przy pomocy klasycznej aparatury, niezawodność sterowania, znaczna ilość napędów itp. / jako pierwsze stymulowały rozwój nowoczesnych koncepcji i urządzeń automatyki. Dopiero w drugiej kolejności zastosowano je w elektrowniach konwencjonalnych. Dowodem tego jest sytuacja w energetyce francuskiej, gdzie nowoczesne, kompleksowe rozwiązania wprowadzono najpierw w elektrowniach jądrowych, potem wykorzystano w elektrowniach konwencjonalnych. Ta wiodąca rola energetyki jądrowej zasługuje na wyraźne podkreślenie.

Elektrownia jądrowa, niezależnie od zastosowanego w niej typu reaktora, jest wyposażona w różnorodne systemy pomiarów. Należą do nich: system pomiarów cieplnych, mechanicznych, chemicznych, elektrycznych, system pomiarów neutronowych i system dozymetryczny. Wykorzystując pewne pomiary z tych grup można tworzyć wyodrębnione podsystemy w rodzaju pomiarów wewnątrzrdzeniowych lub wykrywania nieszczelności elementów paliwowych i nieszczelności obiegów.

Wśród systemów sterowania na plan pierwszy wybija się system zabezpieczeń i blokad. Wyraźnie oddzielony przestrzennie i aparaturowo od innych systemów sterowania, jest zorganizowany tak, aby sprostał szczególnie ostrym wymaganiom niezawodnościowym. Istotną rolę dla dyspozycyjności i bezpieczeństwa eksploatacji pełni system regulacji automatycznej /np. mocy bloku, ciśnienia w obwodzie pierwotnym, poziomów wody itp./, którego głównym zadaniem, obok dostosowania mocy bloku do zapotrzebowania sieci, jest utrzymanie głównych parametrów w granicach uniemożliwiających zadziałanie zabezpieczeń przy zakłóconych stanach pracy. Tak sprecyzowane zadanie układów regulacji automatycznej zmusza nie tylko do zapewnienia im dobrych własności dynamicznych, ale także dużej niezawodności uzyskiwanej drogą stosowania redundancji dla bardziej odpowiedzialnych układów.

Systemy sterowania przebiegiem rozruchu i odstawienia obejmują w istocie całość sterowania automatycznego i ręcznego zdalnego wszystkimi napędami bloku, tj. całość sterowania "binarnego". Ich struktura odpowiada podziałowi bloku na pojedyncze urządzenia wykonawcze, zespoły urządzeń i grupy technologiczne.

System cyfrowy rejestracji i przetwarzania danych CRPD spełnia rolę ogniwa pośred-

niczącego między operatorem a procesem, dostarczając mu odpowiednio przetworzonej i "skoncentrowanej" informacji nie tylko o samym procesie, lecz również o stanie poprzednio wymienionych systemów pomiarów i sterowania. Wyznacza to temu systemowi rolę nadrzędną w stosunku do pozostałych systemów.

Opisana powyżej zasada jednolitego systemu kierowania blokiem stawia przed poszczególnymi składowymi systemami określone wymagania w zakresie ujednoczenia sygnałów przesyłowych, napięć zasilania, standardów mechanicznych i podzespołów elektronicznych. Wymaga to odpowiedniego zorganizowania i uzgodnienia wymagań technicznych na wiele lat przed rozpoczęciem produkcji i dostaw. Spełnienie tego warunku w przypadku elektrowni jądrowych jest trudniejsze niż dla konwencjonalnych ze względu na dużą różnorodność aparatury i specjalne wymagania niezawodnościowe.

Pomimo że wiele systemów pomiarów i automatyki występujących w elektrowniach jądrowych określanych jest mianem "konwencjonalnych", nie można ich zastosować bez odpowiedniej adaptacji lub nawet nowych opracowań. Np. w zakresie pomiarów cieplnych pożądaną jest stosowanie przetworników o sygnale niezerowym /4 - 20 mA/, czujników o wyjątkowo małych stałych czasowych, odporności na wibracje i działanie medium korodującego. Nie bez znaczenia jest długotrwały wpływ promieniowania radioaktywnego, nie mówiąc już o przystosowaniu niektórych przetworników do warunków maksymalnej hipotetycznej awarii.

Aparatura automatycznej regulacji procesów cieplnych wymaga wzbogacenia o regulatory z redundancją i zmian niektórych parametrów technicznych.

W dziedzinie siłowników renomowane firmy natrafiły na trudności w niezawodnym rozwiązywaniu wskazań położenia i przy stosowaniu do warunków środowiska.

Niezawodność działania i łatwość odnajdowania uszkodzeń są najistotniejsze dla zastosowań systemów sterowania rozruchem w elektrowniach jądrowych. Automatyczny rozruch agregatów Diesla czy uruchomienie awaryjnego wtrysku boru musi przebiegać bez zakłóceń. Jeżeli urządzenia były projektowane dla elektrowni konwencjonalnej, mogą nie zawierać tych wszystkich rozwiązań, które będą konieczne dla zastosowania w elektrowni jądrowej. Dlatego często zachodzi potrzeba dalszych udoskonaleń, tym bardziej, że z aparatów tych można zbudować system zabezpieczeń elektrowni.

Również w zakresie systemów CRPD typowe jest stosowanie ze względów niezawodności-

ciowych podwójnego układu komputerów lub systemu składającego się z wielu minikomputerów spełniających różne funkcje. Ilość sygnałów wejściowych i większe wymagania co do częstotliwości próbkowania sprawiają, że zaprojektowanie systemu CRPD dla elektrowni jądrowych jest trudniejsze niż dla konwencjonalnych.

O ile naszkicowana powyżej idea jednolitego systemu sterowania została powszechnie zaakceptowana i nie wykazuje większych zmian, to szczególnie systemy automatyki i pomiarów ulegają dalszej ewolucji wraz z wprowadzeniem nowych rozwiązań technicznych i nowych metod sterowania. Obserwuje się tendencje do szerszego angażowania techniki cyfrowej w proces sterowania. Już obecnie w niektórych elektrowniach jądrowych technika cyfrowa wyparła analogową w zakresie regulacji automatycznej.

Pewną rolę w obecnych pracach badawczych odgrywa stosowanie nowoczesnej teorii sterowania. Pierwsze badania nie potwierdziły oczekiwanych efektów w stosunku do regulacji klasycznej, przynajmniej dla niektórych typów elektrowni. Użyteczna może się okazać możliwość wykorzystania metod estymacji parametrów niemierzalnych.

Istotnym zagadnieniem, którego podstawy teoretyczne łączą się z powyższą dziedziną jest regulacja przestrzennego rozkładu strumienia w rdzeniu.

W dziedzinie regulacji automatycznej wprowadza się dalsze usprawnienia strukturalne, prowadzące do poprawy jakości regulacji przy większych zmianach obciążeń, uwzględnianiu ograniczeń i adaptowaniu układów do pracy w szerokim zakresie zmian obciążeń.

Wiele uwagi poświęca się unowocześnieniu i nowemu zorganizowaniu nastawni odpowiednio do możliwości, które wynikają ze stosowania wymienionych urządzeń automatyki i pomiarów /miniaturyzacja, pulpity mozaikowe, monitory ekranowe/.

Można sądzić, że przedstawione powyżej zasady automatyzacji bloków jądrowych będą w ogólnych zarysach obowiązywać w okresie najbliższych 15 - 20 lat i będą podlegać dalszej ewolucji w miarę wprowadzania nowych środków pomiarowych i sterowania. Takí zakres będzie odpowiadał przeciętnemu poziomowi światowemu w tych latach.

Reasumując wnioski, wynikające z wyżej przytoczonej charakterystyki systemów automatyki elektrowni jądrowych, można stwierdzić, że systemy te cechują się:

- wysokim stopniem nowoczesności rozwiązań /stosowanie najnowszych środków aparaturowych i osiągnięć teorii sterowania/;

- niezawodnością działania w trudnych warunkach środowiskowych, odmiennych od warunków w innych dziedzinach przemysłu;  
- wysokimi parametrami technicznymi pozostałych urządzeń.

Innymi słowy, wspólną cechą tych systemów i aparatów jest ich wysoka jakość.

Pomimo pewnych różnic istnieje ścisły związek i współzależność problemów automatyzacji elektrowni konwencjonalnych i jądrowych. Na takie same zależności można wskazać porównując zagadnienia sterowania reaktorów badawczych i energetycznych.

### 3. Ogólna charakterystyka prac prowadzonych w kraju

Referaty przygotowane na konferencję świadczą o znacznym zakresie realizowanych w kraju prac. W latach 1972-75 prowadzono je głównie w ramach problemu węzłowego 04-1-2 /temat 08/, Koncentrowały się one w dwu współpracujących ze sobą instytucjach: w Instytucie Automatyki Systemów Energetycznych /IASE/ we Wrocławiu i w Instytucie Badań Jądrowych /IBJ/ w Świerku. Takí dobór głównych wykonawców umożliwia uwzględnienie całości problematyki i ogólnych zagadnień dotyczących elektrowni z częścią cieplno-mechaniczną i zagadnień reaktorowych. W pracach uczestniczą ponadto inne instytuty i wyższe uczelnie.

Również Zjednoczenie "Mera" żywo interesuje się nową problematyką i należy oczekiwać aktywnego udziału podległych mu instytutów i przedsiębiorstw przemysłowych w dalszych pracach w latach 1976-80.

W dotychczasowej działalności można wyróżnić trzy grupy zagadnień:

1/ Prace podstawowe, związane z rozpoznaniem własności obiektu i systemów sterowania, prowadzące do weryfikacji istniejących rozwiązań i opracowania nowych systemów automatyki opartych na krajowej aparaturze.

2/ Opracowania związane z wyposażeniem aparaturowym, ale nie będące opracowaniami konstrukcyjnymi /np. rozpoznanie możliwości stosowania krajowej aparatury/.

3/ Opracowania o charakterze konstrukcyjnym /opracowania nowej aparatury lub adaptacja aparatury już produkowanej/ i złożonych systemów /np. system centralnej rejestracji i przetwarzania danych CRPD i system pomiarów wewnątrzrdzeniowych/.

W pierwszej grupie wykonano już szereg opracowań o charakterze rozpoznawczym i rozpowszechniono je wśród zainteresowanych. Zaawansowano prace nad modelowaniem matematycznym własności dynamicznych elekrowni

i ich systemów sterowania /układy regulacji i sterowanie sekwencyjne/. Prace te wraz z opracowaniami z drugiej grupy są niezbędne do opanowania podstawowych zagadnień automatyzacji elektrowni jądrowych i przygotowania kadry specjalistów do uczestniczenia w procesie inwestycyjnym w projektowaniu elektrowni jądrowych w Polsce. W pięcioleciu 1976-80; tematyka będzie kontynuowana w jeszcze szerszym zakresie, zwłaszcza że pojawi się konieczność analiz systemów oferowanych dla pierwszego bloku jądrowego.

Znaczny postęp zanotowano w grupie trzeciej, gdyż opracowano i rozpoczęto eksport specjalnej aparatury do kontroli reaktora energetycznego w szerokim zakresie zmian mocy, zaawansowano opracowanie układów redundancyjnych dla systemów regulacji i pomiarów wewnątrzrdzeniowych. Na ważność tych dwóch ostatnich opracowań warto zwrócić szczególną uwagę, gdyż są one etapami pośrednimi - do wykonania systemu CRPD dla elektrowni jądrowej, a jednocześnie - dzięki przejściowemu wdrożeniu pierwszego opracowania w elektrowni konwencjonalnej - dają bezpośredni efekt praktyczny. Można zresztą wśród opracowań dotychczas wykonanych i planowanych do realizacji znaleźć i inne nadające się do wykorzystania w energetyce konwencjonalnej.

Wykonane prace umożliwiły wystąpienie z poważnymi ofertami na dostawy aparatury w ramach "Interatomenergo" i z konkretnymi propozycjami współudziału w dostawach dla pierwszych bloków jądrowych w Polsce. Sformułowano również szczegółowe wymagania co do zakresu automatyzacji pierwszego bloku jądrowego w elektrowni "Żarnowiec" przedstawione stronie radzieckiej jako materiał do rozmów kontraktowych.

Kontynuacja tych prac w pięcioleciu 1976-80 będzie również koncentrowała się na trzech wymienionych kierunkach. Około 1980-83 r. powinny zostać przygotowane wszelkie dane do projektowania oraz aparatura, która umożliwi udział naszego przemysłu w wyposażeniu bloków 440 MW i 1000 MW w dziesięcioleciu 1980-90.

W latach 1972-75 nakłady na dotychczasowy temat 08 problemu węzłowego 04-1-2 /łącznie ze znacznymi zakupami aparatury w tym sprzętu komputerowego/ przekroczyły 50 mln zł, w pięcioleciu 1976-80 nakłady te wzrosną kilkakrotnie.

#### 4. Celowość prowadzenia prac naukowo-badawczych i dostaw systemów automatyki elektrowni jądrowych przez przemysł krajowy

Aby uzasadnić celowość zajmowania się problemami automatyzacji elektrowni jądrowych, można posługiwać się argumentami

ekonomicznymi wskazującymi na ilościowe korzyści, np. polegające na eliminacji importu i prowadzenia eksportu aparatury. Podstawą tych obliczeń jest założenie udziału przemysłu krajowego w wyposażeniu bloków jądrowych budowanych w Polsce i dostawy eksportowe w ramach "Interatomenergo". Porównując np. ceny wybranych systemów automatyki elektrowni jądrowej z reaktorem WWER - 440 /źródłem ich jest elektrownia Loviisa budowana w Finlandii/ oraz koszty opracowania i wyprodukowania tych systemów w kraju, dochodzi się do wniosku, że przedsięwzięcie to jest opłacalne już dla jednego bloku jądrowego. Tendencje udziału przemysłu krajowego w dostawach dla pierwszych polskich elektrowni jądrowych znajdują z pewnością odbicie w rozmowach kontraktowych z ZSRR. W okresie konferencji będą być może znane pierwsze wyniki tych rozmów. Dla propozycji polskich jak i dla uruchomienia prac badawczo-rozwojowych istotny jest fakt, że ZSRR dotychczas nie oferuje pewnych systemów automatyki ważnych dla ekonomicznej i niezawodnej eksploatacji elektrowni /system CRPD z kontrolą wewnątrzrdzeniową i systemem automatycznego sterowania sekwencyjnego/.

Istotne wpływy dewizowe można będzie osiągnąć realizując większe dostawy wg ofert złożonych w "Interatomenergo". Np. zakładając że do 1985 r. będą realizowane dostawy czterech bloków 440 MW i dwóch 1000 MW, można liczyć na wpływy przekraczające 5 mld zł.

Dla uzasadnienia celowości zajmowania się problemami automatyzacji elektrowni jądrowych można użyć jednak głównie szeregu argumentów natury ogólnej, za którymi nie stoją ściśle obliczenia finansowe.

Budownictwo elektrowni jądrowych, a także zagadnienia ich automatyzacji, stanowią poważny stymulator ogólnego postępu technicznego, ułatwiając opanowanie nowych technologii produkcji urządzeń wyróżniających się wysokimi wskaźnikami jakościowymi. Sprostanie przez przemysł krajowy wymaganiom, jakie postawi przed nim energetyka jądrowa, będzie miało korzystny wpływ na poziom produkcji środków automatyzacji i poszerzenie oraz unowocześnienie ich asortymentu. Jest to zgodne z tendencjami rozwojowymi przemysłu aparaturowego, który jest obecnie dostosowany do rosnących potrzeb energetyki konwencjonalnej i innych przemysłów. Wskazują na to wchodzące do produkcji nowe opracowania i zakupy licencji. Jednocześnie realizuje się szeroki program unowocześnienia automatyki elektrowni konwencjonalnych i należy oczekiwać zlikwidowania pewnych opóźnień w tym zakresie. Trzeba także odnotować dobry poziom i rozwój produkcji specjalnej aparatury reaktorowej w resorcie Urzędu Energii Atomowej. Wszystkie te działania opierają się na rozbudo-



wanej bazie naukowo-badawczej skupionej w kilku resortach i zjednoczeniach /Urząd Energii Atomowej, Zjednoczenie "Mera", Zjednoczenie Energetyki/.

Jak już wspomniano, zagadnienia automatyzacji elektrowni jądrowych są kontynuacją problemów automatyzacji elektrowni konwencjonalnych i reaktorów badawczych. W ten sposób, zajmując się energetyką jądrową, można wykorzystać nagromadzone doświadczenia i kadrę naukowo-badawczą i projektową. Energetyka jądrowa jest interesującym terenem działalności naukowo-badawczej, w przeciwieństwie do konwencjonalnej, gdzie trzeba się liczyć z wyczerpywaniem się nowej problematyki.

Zjednoczenia, instytuty i zakłady przemysłowe, popierając prowadzenie prac naukowo-badawczych i dostawy wykazały zrozumienie faktu, że w dalszej przyszłości automatyzacja elektrowni jądrowych stanie się zasadniczym polem ich działania.

Ważnym argumentem za prowadzeniem prac dla energetyki jądrowej jest rozszerzenie obszaru zastosowań i wzrost opłacalności prac realizowanych dla energetyki konwencjonalnej i nad unowocześnieniem aparatury automatyki ogólnego przeznaczenia.

Wyposażenie polskich bloków jądrowych w aparaturę produkcji krajowej zapewni ujednolicenie aparatury w całej energetyce. Brak jednolitości występującej obecnie odczuwa się jako poważną przeszkodę prawidłowej eksploatacji.

Niezależnie od perspektyw i zakresu przyszłych dostaw ważne jest przygotowanie kadry, która zdobędzie dobrą znajomość problematyki i będzie przygotowana do projektowania i eksploatacji systemów automatyki. Najlepszą drogą do tego celu jest samodzielne wykonywanie podstawowych prac.

Dostawy automatyki dla elektrowni jądrowych nie wymagają tworzenia nowych gałęzi przemysłu, lecz jedynie pewnej rozbudowy bazy produkcyjnej i zaplecza przy stosunkowo niewielkich nakładach inwestycyjnych. Produkcja w tej branży jest szczególnie atrakcyjna z punktu widzenia ekonomiki kraju, uwzględ-

nia bowiem wysoki udział myśli technicznej w ogólnych kosztach i stosunkowo niewielkie zapotrzebowanie na materiały.

Brak pewnych ważnych systemów automatyki w ofercie elektrowni 440 MW skłania do skoncentrowania wysiłków na określonych kierunkach, co spotyka się z poparciem ze strony ZSRR. Dostawca radziecki przywiązuje dużą wagę do współpracy międzynarodowej. Bez niej opracowanie wielu skomplikowanych systemów sterowania byłoby niemożliwe, zwłaszcza gdy chodzi o blok 1000 MW, którego konstrukcja stawia przed systemami aparatury szereg nowych wymagań. W skrajnych przypadkach można liczyć się z wyraźnymi postulatami dostawcy uzupełnienia jego dostaw wybranymi urządzeniami i systemami. W tych warunkach zachowanie biernej postawy może doprowadzić do niewystarczającego poziomu nowoczesności automatyki w polskich elektrowniach jądrowych, a więc do tej samej sytuacji, która, obserwuje się obecnie w krajowej energetyce konwencjonalnej.

Znane trudności, z jakimi boryka się energetyka przy wyposażeniu nowych bloków konwencjonalnych, mogą wywoływać sceptycyzm, co do realności poważnego zaangażowania się krajowego przemysłu u dostawcy dla energetyki jądrowej, a zwłaszcza eksportu aparatury. Trzeba jednak pamiętać, że dostawy mają nastąpić na początku lat osiemdziesiątych i sytuacja do tej pory powinna ulec gruntownej poprawie. Wątpliwości co do tego byłyby równoznaczne z założeniem, że realizowane obecnie programy rozwoju nie przyniosą oczekiwanych rezultatów.

Celowość zaangażowania w problematykę automatyzacji elektrowni jądrowych wcześniej spostrzegły sąsiednie kraje socjalistyczne. Np. w CSRS istnieje szeroki uzgodniony z ZSRR i realizowany z dużym rozmachem program wyposażenia czeskosłowackiej elektrowni 440 MW i 1000 MW w aparaturę własnej produkcji.

Dotrzymanie kroku tym występującym wszędzie tendencjom i dążenie do dorównania przeciętnemu poziomowi światowemu powinno być wytyczną do dalszych działań w zakresie problemów automatyzacji w kraju i obejmować swoim zasięgiem także problemy automatyzacji elektrowni jądrowych jako dziedziny najbardziej związanej z postępem technicznym.

mgr inż. ZYGMUNT JAKUBOWSKI

mgr inż. TADEUSZ TOMCZAK

Instytut Automatyki Systemów Energetycznych  
Wrocław

## DOŚWIADCZENIA ZAGRANICZNE

### I TENDENCJE ROZWOJOWE SYSTEMÓW AUTOMATYKI

#### ELEKTROWNI JĄDROWYCH Z REAKTORAMI WODNO-CISNIENIOWYMI

W kompleksie zagadnień związanych z budową, a następnie eksploatacją elektrowni jądrowych, automatyka zajmuje bardzo ważną pozycję. Wynika to zarówno ze znaczenia tej dziedziny w bezpiecznej i ekonomicznej pracy elektrowni, jak i znacznego jej udziału w całkowitych kosztach inwestycyjnych.

Porównując poziom automatyzacji elektrowni jądrowych /wrzących, grafitowo-gazowych i innych/ należy stwierdzić, że w tych drugich jest on wyższy. Dotyczy to szczególnie zastosowania techniki cyfrowej. W elektrowniach francuskich, angielskich czy kanadyjskich od kilku lat obserwuje się próby zastosowania techniki cyfrowej do bezpośredniego i nadrzędnego sterowania, m. in. do sterowania sekwencyjnego. Próby te nie zawsze jednak przynoszą spodziewane efekty. Ostrożnie stosowanie techniki cyfrowej w elektrowniach z reaktorami PWR wynika przede wszystkim stąd, że przestały one już być eksperymentalnymi /czego nie można powiedzieć o innych typach elektrowni jądrowych/ i jako coraz powszechniejsze źródła energii elektrycznej /zwłaszcza w USA, ZSRR, RFN/ podlegają ostrzejszym ograniczeniom w zakresie nakładów finansowych na automatyzację, a także wyższym wymaganiom pod względem dyspozycyjności i bezpieczeństwa.

Integracja systemów automatyki w elektrowniach jądrowych z reaktorami PWR jest w zasadzie wynikiem ogólnych tendencji w automatyzacji elektrowni [1] zarówno jądrowych jak i konwencjonalnych. Oznacza ona wzrost spójności systemu automatyki /przez wzrost wzajemnych powiązań/, a tym samym - wzrost sprawności i funkcjonalności poszczególnych środków automatyzacji /regulacji, sterowania binarnego, sygnalizacji, przetwarzania danych, sterowania nadrzędnego/. Procesy integracyjne stały się możliwe dzięki:

- podziałowi urządzeń automatyzacji zgromadzonych na niższych poziomach na rozsądne i przejrzyste odcinki /odpowiadające sterowanemu przez nie jednostkom technologicznym/ między którymi występuje minimalny przepływ informacji i w ramach których obowiązują jednolite zasady przetwarzania;

- przygotowywaniu wielkości pomiarowych według możliwie jednolitych zasad, a następnie przekazywaniu ich w znormalizowanej postaci do dalszego przetwarzania;

- standaryzacji przetwarzania i rozdzielania sygnałów sterujących siłowniki i urządzenia przełączające.

Naturalnym procesem związanym z integracją jest centralizacja w zakresie nadrzędne go kierowania całym blokiem, w czym niemałą rolę odgrywa rozwój techniki cyfrowej.

Na rys. 1 przedstawiona jest struktura systemu automatyki, charakterystyczna dla nowoczesnej elektrowni. Mówiąc o elektrowniach z reaktorami PWR należy je w wielu przypadkach traktować jako przyszłościowe, szczególnie jeśli chodzi o powiązania systemu cyfrowego z układami sterowania binarnego i układami regulacji. Zwraca się uwagę na pozostawienie w nastawni konwencjonalnych środków kontroli, sygnalizacji i oddziaływań sterujących - mimo zastosowania systemu cyfrowego, wyposażonego w nowoczesne środki dialogu operatora z systemem /monitory, drukarki itp/.

Wzrost zakresu automatyzacji sterowania procesami rozruchu i odstawiania urządzeń, dający się zauważyć w ostatnich latach, spowodowany jest:

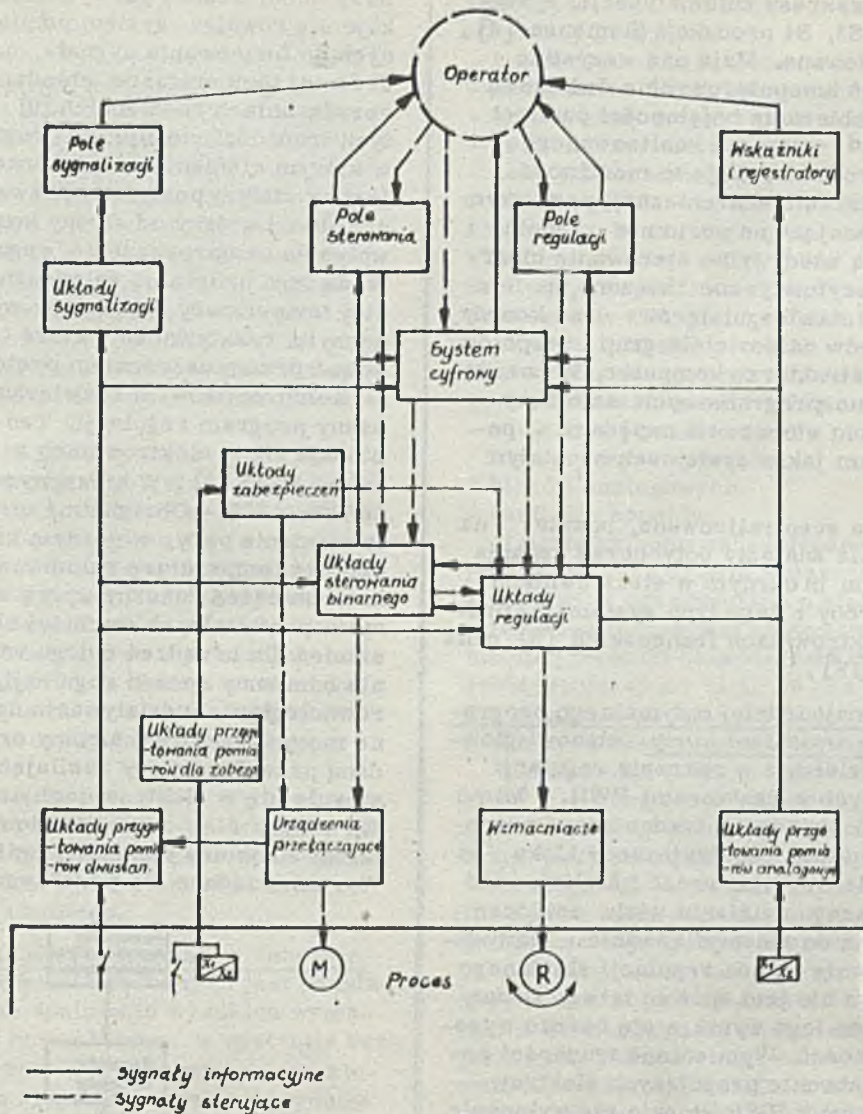
- możliwościami wyeliminowania pomyłek istotnych ze względu na bezpieczeństwo;

- możliwościami osiągnięcia znacznych efektów ekonomicznych poprzez skrócenie czasu rozruchu przy procesach opisanych skomplikowanymi algorytmami oraz większej dokładności w prowadzeniu niektórych parametrów bloku /np. prędkości zmian mocy, naprężenia termiczne itp/;

- potrzebą odciążenia operatora od dużej ilości czynności sterowniczych;

- pojawieniem się systemów sterowania binarnego, charakteryzujących się wysoką niezawodnością przy stosunkowo niskiej cenie.

Fakt, że w elektrowniach radzieckich charakterystyczne jest ograniczenie się prawie wyłącznie do prostych układów zdalnego sterowania, częściowo uzasadnić można pracą tych elektrowni na obciążeniu podstawowym, co eliminuje potrzebę częstego odstawiania i



Rys. 1. Struktura zintegrowanego systemu automatyki, typowa dla nowoczesnej elektrowni jądrowej

rozruchu urządzeń. W elektrowniach amerykańskich stosuje się do sterowania automatyki o prostych programach kombinacyjnych.

Należy sądzić, że jest to podyktowane raczej względami ekonomicznymi - taki rodzaj sterowania jest po prostu najtańszy.

Znacznie dalej w swoich rozwiązaniach idą projektanci układów automatyki w RFN. Dysponując systemami aparatury stałoprogramowej o strukturze hierarchicznej /Simatic, Iskamatic, Geamatic/ o dobrych własnościach eksploatacyjnych, stosują w szerokim zakresie sterowanie dla grup i zespołów technologicznych [3]. Na poziomach sterowania zespołów i grup wprowadza się powiązania z układami regulacji pozwalające na automatyczne sterowanie procesami ciągłymi. Oddziaływanie układów sterowania binarnego polega w tym wypadku najczęściej na: załączeniu lub wyłączeniu odpowiedniego układu regulacji oraz sterowaniu nastawnikiem do odpowiedniego położenia.

W niektórych przypadkach możliwe jest również oddziaływanie na wartość zadaną /w zasadzie oddziaływanie to należy do funkcji poziomu kierowania blokiem/.

Dla zilustrowania wzrastającego zakresu automatyzacji można przykładowo podać [2], że w elektrowni Obrigheim, oddanej do eksploatacji w 1968 r. sterowaniem automatycznym objęta była 1 grupa technologiczna i 6 zespołów, a łączna ilość kroków sekwencyjnych wynosiła 132. W elektrowniach Stade i Biblis, wybudowanych kolejno w 1972 i 1974 r., sterowaniem objętych było odpowiednio: 6 grup i 33 zespoły oraz 10 grup i 47 zespołów o łącznej liczbie 257 i 517 kroków sekwencyjnych. Fakt, że w elektrowniach nie wszystkie dające się wyróżnić jednostki technologiczne objęte są sterowaniem automatycznym, powoduje nieopłacalność szerszego stosowania oddziaływań z poziomu kierowania blokiem.

Zastosowanie w najbliższych latach systemów zmiennie-programowych opartych na technice procesorowej, powinno spowodować

dalszy wzrost zakresu automatyzacji. Systemy takie /np. S3, S4 produkcji Siemens [4], są już eksploatowane. Mają one wszystkie zalety urządzeń komputerowych z dodatkową możliwością dobierania pojemności pamięci w zależności od wymagań realizowanego algorytmu sterowania. Daje to możliwość pracy w strukturze hierarchicznej, przy czym urządzenia pracujące na poziomie zespołu i grupy realizują wtedy tylko sterowanie binarne. Operacje arytmetyczne związane np. z obliczeniem nastaw regulatorów oraz koordynacją programów na poziomie grup i zespołów pełni w takiej strukturze komputer. W rozwiązaniach zmienno-programowych najniższy poziom - poziom sterowania napędami - pozostaje taki sam jak w systemach o stałym programie.

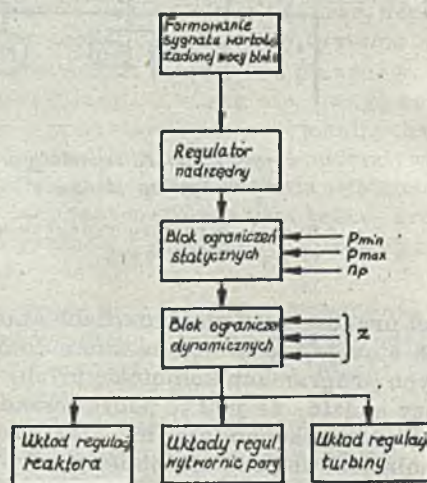
Rozwiązania scentralizowane, oparte na komputerze, nie znalazły dotychczas uznania przy sterowaniu binarnym w elektrowniach jądrowych. Próby z tego typu systemami prowadzono w elektrowniach francuskich [5] oraz kanadyjskich [13].

Poszukiwanie najbardziej optymalnego programu sterowania zmianami mocy stanowi główny kierunek działania w zakresie regulacji bloków jądrowych z reaktorami PWR. Mimo wieloletnich doświadczeń trudno uznać pracujące obecnie układy regulacji mocy bloku za optymalne. Wielowymiarowość i nieliniowość obiektu, poddanego działaniu wielu zakłóceń - trudnych nieraz do zidentyfikowania - powodują, że znalezienie układu regulacji zbliżonego do optymalnego nie jest sprawą łatwą. Dodatkowo, od układu tego wymaga się bardzo wysokiej niezawodności. Wymienione trudności powodują, że w obecnie pracujących elektrowniach z reaktorami PWR stosuje się wyłącznie struktury oparte na regulatorach analogowych. W większości przypadków są to kaskadowo połączone układy regulacji mocy: turbiny i reaktora, oddziałujące na położenie zaworów przed turbiną oraz na położenie prętów sterujących reaktora.

Naturalne nadążanie reaktora typu PWR za obciążeniem, wynikające z ujemnego temperaturowego współczynnika reaktywności, wiąże się z jednoczesną zmianą średniej temperatury chłodziwa oraz ciśnienia pary przed turbiną. Program, w którym stosuje się jednoczesną zmianę wymienionych parametrów /zgodnie z naturalnymi własnościami reaktora/ stosuje się w EJ Surry - USA. Wydaje się, że z punktu widzenia skomplikowania struktury układu regulacji lepsze są programy, w których jeden z parametrów utrzymywany jest jako stały. Program o stałej średniej temperaturze chłodziwa stosowany był w pierwszych elektrowniach amerykańskich i radzieckich oraz we francuskiej elektrowni Ardennes. Zastosowanie tego rodzaju programu powoduje duże zmiany parametrów w obiegu wtórnym, /temperatury oraz ciśnienia pary/, co prowadzi do dodatkowych strat i obniżenia sprawności układu.

Przy dużej ilości pętli cyrkulacyjnych komplikuje się również system pomiarów wymaganych do formowania sygnału, odpowiadającego średniej temperaturze chłodziwa. W nowych rozwiązaniach radzieckich [9] dla uniknięcia tych trudności stosuje się program regulacji, w którym ciśnienie pary wtórnej utrzymywane jest na stałym poziomie; pozwoliło to uprościć obwód wtórny od strony konstrukcyjnej i wpłynęło na uproszczenie regulacji turbiny. Wadą tego programu są znaczne zmiany średniej temperatury chłodziwa, wywołujące duże odchyłki reaktywności, które trzeba kompensować przemieszczeniem prętów sterujących.

Kompromisowym rozwiązaniem jest mieszany program regulacji. Ten typ programów stosuje się w elektrowniach w RFN /Obrigheim, Stade [6]. W niższym zakresie obciążenia /0 + 65% - Obrigheim/ utrzymuje się stałe ciśnienie pary, w górnym zakresie - stałą średnią temperaturę chłodziwa. Na dolny zakres obciążenia znaczny wpływ mają ograniczenia dopuszczalnych wartości obliczeniowych ciśnień dla urządzeń obiegu wtórnego. Zupełnie odmienny sposób regulacji, polegający na równoległym oddziaływaniu na wartości zadane mocy: reaktora i turbiny oraz wartość zadaną przepływu wody zasilającej wytwornicę stosuje się w elektrowniach amerykańskich [7]. Na rys. 2 przedstawiony jest schemat takiej struktury dla elektrowni Rancho Seco. Wartości zadane dla poszczególnych układów



Rys. 2. Struktura układu sterowania mocą elektrowni Rancho Seco /USA/

regulacji formowane są na podstawie wartości zadanej mocy bloku, przy uwzględnieniu ograniczeń statycznych /max obciążenie bloku -  $p_{max}$ , min, obciążenie bloku -  $p_{min}$ , dopuszczalne prędkości zmian mocy -  $np$ / oraz dynamicznych -  $z$ . W czasie normalnej pracy dla omawianego układu stosuje się następujące wartości ograniczeń statycznych:  $p_{max}$  102%,  $p_{min}$  15%,  $np$  10%/min.

Ograniczenia dynamiczne działają na ograniczenie mocy bloku w przypadku gdy:

- jedna lub więcej pomp chłodziwa nie działa,

- całkowity przepływ wody zasilającej jest mniejszy od żądanego o więcej niż 5%,
- cztery grupy prętów zabezpieczających nie znajdują się w pełnej wycofanej pozycji,
- nastąpiło asymetryczne wycofanie prętów,
- generator jest odłączony od linii 230 kV.

Taki rodzaj sterowania, dający szybko i jednocześnie reakcję reaktora i turbiny na zakłócenia obciążenia jest szczególnie przydatny w warunkach częstych i szybkich zmian obciążenia, a więc dla bloków pracujących w układzie automatycznej regulacji częstotliwości i mocy sieci. Najbliższe lata powinny przynieść powszechniejsze zastosowanie wielopoziomowych układów sterowania mocą bloków jądrowych.

Nie obserwuje się dotychczas prób zastosowania optymalnych regulatorów cyfrowych do sterowania mocą bloków z reaktorami PWR. Podstawowe trudności, jakie się tu zarysowują, wiążą się ze sformułowaniem najważniejszego kryterium jakości /z uwzględnieniem ograniczeń stawianych przez sformalizowane metody optymalizacji/ oraz stworzeniem modelu niskiego rzędu, bez dużych strat w dokładności opisu, a także z realizacją techniczną regulatora pracującego w czasie rzeczywistym.

Pozytywnie natomiast ocenia się perspektywy zastosowań bezpośredniego sterowania cyfrowego dla mniej ważnych, dających się opisać prostszym modelem matematycznym układów bloku jądrowego.

Niezależność strukturalna układów zabezpieczeń w elektrowniach jądrowych jest podstawowym środkiem spełnienia wysokich wymagań stawianych tym układom w systemie bezpieczeństwa elektrowni, polegających na niedopuszczeniu do niebezpiecznych warunków pracy reaktora i innych urządzeń bloku lub na zmniejszeniu skutków takiego przekroczenia. Niezależność ta osiągana jest przez oddzielne "przygotowanie" pomiarów oraz wyraźne oddzielenie funkcji zabezpieczeń od pozostałych funkcji systemu automatyki. Wynika stąd, że dla celów zabezpieczeń nie można wykorzystywać pomiarów dokonywanych dla innych celów /regulacji, sterowania binarnego itp/. Możliwa jest natomiast odwrotna sytuacja, np. w elektrowniach francuskich [10] kanał regulacyjny wykorzystuje sygnał jednego z czterech przetworników systemu zabezpieczeń /oczywiście, za pośrednictwem wzmacniacza seperacyjnego/. Projektanci niemieccy postulują stosowanie 2 różnych parametrów, a nawet funkcji matematycznej, jako inicjujących sygnał alarmowy [10].

Dla ważniejszych obwodów systemu zabezpieczeń, szczególnie reaktora, przyjmuje się jako zasadę stosowanie redundancji /zwielokrotnienie, z wyborem "k z n"/. Nie ma dotychczas ścisłej zgodności co do rodzaju redundancji. Za granicą /CSR/ [11] prowadzone są prace nad zagadnieniem optymalnej struktury układów z redundancją. Jako skład-

niki kryterium określającego jakość takiej struktury przyjmuje się:

- koszt uszkodzenia niebezpiecznego,
- koszt uszkodzenia bezpiecznego,
- koszt jednej gałęzi kanału redundacyjnego,
- koszt konserwacji,
- cenę członu wyboru.

Jako ograniczenia przyjmuje się wymagany czas pracy bezawaryjnej oraz czas odnowy. Przyjmując dosyć wiarygodne dane wyjściowe ustalono, że zbliżone do optymalnego jest rozwiązanie z blokiem wyboru 2 z 4.

Warunkiem efektywności rozwiązań układów z redundancją jest zachowanie fizycznego i galwanicznego oddzielenia dla:

- czujników i przetworników pomiarowych,
- tras przesyłu sygnałów,
- bloków analogowych,
- zasilania kanałów.

Logika układów zabezpieczeń realizowana jest dotychczas prawie wyłącznie w sposób klasyczny w urządzeniach o stałym programie. Powszechnie jest stosowanie tzw. dynamicznej techniki układów zabezpieczeń, charakteryzującej się tym, że raz zapoczątkowane działanie obwodu zabezpieczającego nie może być powstrzymane i dochodzi do końca.

Redundancja podnosi znacznie niezawodność, nie uwzględnia jednak faktu, że podobne elementy składające się na te układy mają podobne wady, wynikające z podobnej technologii ich wykonywania, co może wywołać awarię kilku kanałów jednocześnie. Dla uniknięcia tego typu niesprawności przyjęto jako regułę, że układy zabezpieczeń podlegają okresowemu testowaniu. Wielu specjalistów z dziedziny zabezpieczeń elektrowni jądrowych zwraca uwagę na niezadowalające wskaźniki niezawodnościowe czujników i elementów wykonawczych. Znajduje to odzwierciedlenie w położeniu większego nacisku na ten kierunek badań.

Niezwykle kontrowersyjnym problemem jest zastosowanie techniki cyfrowej w układach zabezpieczeń [10]. Komputeryzacja zabezpieczeń wiąże się z ich scentralizowaniem, podczas gdy w rozwiązaniach klasycznych zabezpieczenia są indywidualne dla każdego układu bloku jądrowego i dla każdego typu przewidywanych zakłóceń. Zmniejsza to znacznie ilość aparatury i ogranicza okablowanie. Uzyskuje się również możliwość dowolnie częstego testowania układu. Podstawowa wada polega na znacznych konsekwencjach awarii komputera, o wiele większych niż w układach klasycznych. Elastyczność logiki i możliwość dysponowania zwiększoną ilością informacji /oprócz wymienionych zalet/ powodują, że obecnie rozpoczyna się badania nad skomputeryzowanymi zabezpieczeniami dla elektrowni jądrowych. Należy przypuszczać, że w pierwszym etapie będą one pełniły tylko funkcje doradcze.

Zastosowanie techniki cyfrowej ogranicza się obecnie w elektrowniach z reaktorami

PWR prawie wyłącznie do centralnej rejestracji i przetwarzania danych. Potrzeba realizowania tego rodzaju funkcji przez komputer uzasadniana jest dużą ilością pomiarów /np.: w Biblis dokonuje się 8700 pomiarów [2]. Oprócz funkcji takich jak: uśrednianie wartości pomiarowych, linearyzacja, badanie tendencji zmian, badanie na przekroczenie, i innych typowych dla systemów CRPD - systemy zainstalowane w elektrowniach z reaktorami PWR realizują funkcje specjalne [17], jak np. obliczanie: rozkładu gęstości mocy, rozkładu ksenonu, stopnia wypalania paliwa, minimalnych współczynników DNE /odległość od punktu wrzenia/, bilansu reaktywności rdzenia.

Z punktu widzenia prowadzenia bloku, efekty z zastosowania komputera zależą w znacznej mierze od sposobu przedstawienia przetworzonej informacji. Informację podawaną za pomocą tekstów na ekranach monitorów uzupełnia się coraz częściej schematami fragmentów układu technologicznego - niekiedy z możliwością wybierania pomiarów za pomocą pióra świetlnego. Rozkład parametrów reaktora /strumień neutronów, temperatury itp/ przedstawia się za pomocą barwnych wykresów przestrzennych.

Często systemowi CRPD powierza się dodatkową funkcję nadzoru pracy urządzeń lub zespołów urządzeń poprzez śledzenie ich charakterystyki. W elektrowni Obrigheim [12] nadzór obejmuje:

- sygnalizację zbyt dużych różnic między charakterystykami aktualnymi obliczonymi na podstawie pomiarów a założonymi /dotyczy to np.: pomp, wentylatorów, dobroci podgrzewaczy itp. /;

- nadzór za pomocą specjalnych programów, np.: w przypadku wystąpienia zbyt dużego uchybu regulacji system sprawdza stan urządzeń wykonawczych i wskazuje przyczynę niesprawności.

Jak wspomniano, w elektrowniach z reaktorami PWR nie stosuje się dotychczas systemów cyfrowych dla celów sterowania. Możliwości w tym zakresie ilustruje przykład elektrowni Dungeness "B" z reaktorem typu AGR [14]. Poza funkcjami przetwarzania danych system realizuje zadania sterowania: rozruchem reaktora, rozruchem turbiny, rozkładem mocy w rdzeniu reaktora.

Powierzenie systemom cyfrowym funkcji sterowania pociąga za sobą wyższe wymagania niezawodnościowe i - co się z tym wiąże - znaczne skomplikowanie struktury systemu. W elektrowni Obrigheim, w której system realizuje tylko funkcje CRPD, stosuje się strukturę opartą na jednym procesorze - Siemens 305. W Stade stosuje się już dwie sprzężone jednostki centralne 305, rezerwujące się na wypadek awarii. W elektrowni Dungeness "B" system wyposażony jest w trzy identyczne jednostki centralne; dwie współpracują stale z systemem wejść - wyjść dwu bloków energie-

tycznych, trzecia jest rezerwowa. Przewidziane jest również zdwojenie zewnętrznych pamięci bębnowych. Bardziej rozbudowaną strukturę ma system cyfrowy w Halden. Składa się on z części scentralizowanej nazwanej w skrócie DEMP /Decentralised Modular Process Computer System/ oraz części operacyjno-komunikacyjnej, w skrócie OPCOM /Operator - Communication System/.

Układ DEMP ma strukturę opartą na wzajemnie połączonych czterech miniprocessorach, wyposażonych w cztery moduły pamięciowe. W przypadku uszkodzenia jednego z nich, funkcje jego przejmują pozostałe, mając dostęp do jego pamięci poprzez specjalny moduł. Wszystkie cztery procesory połączone są za pomocą wspólnego układu interface, mając w razie potrzeby dostęp do dowolnych urządzeń wejścia-wyjścia. Taka struktura, że względu na swoją elastyczność, daje lepsze możliwości zastosowania strategii sterowania wielopoziomowego.

#### Literatura:

- [1] H. J. Friedrich, W. Opitz: Die integrierte Automation im Kraftwerk - Überblick und Tendenzen. Dokumentation DE2. Materiały firmy Hartmann-Braun, 1971 r.
- [2] A. Gotz, R. Jaerschky, E. Reiss: Die Automatisierung von Kernkraftwerken. Atomwirtschaft - Atomtechnik nr 2/75
- [3] H. Hermann, H. J. Kinscher: Automatisches Anfahren eines Kraftwerksblockes. Dokumentation DE2. Materiały firmy Hartmann-Braun, 1971 r.
- [4] M. Friebe: Das Steuersystem Simatic S - Neue Technische Möglichkeiten in der Steuerung. Materiały - kraftwerkstagung Siemens - Leittechnik, Karlsruhe 1974 r.
- [5] P. Arnault, J. Levy: Le calculateur numérique utilisé dans les automatismes a séquences d'une centrale nucléaire EDF4". Materiały symposium - L'automatisation dans la production et la distribution de l'énergie électrique. Bruxelles 1967 r.
- [6] W. Aleite, G. Lepie, T. Rancher: Die Regelung des Kernkraftwerks Obrigheim. Atom und Strom, nr 11/12 1967 r.
- [7] Docket 50335-2: Rancho Seco Power Station 1970 r.
- [8] J. Olszewskij: Sistema regulowania i mocznosci AES s regulatorom ARM - Symposium SEW: Kontrol i upravljenje jadernymi reaktorami i oborudowanijem AES. Budapeszt 1969 r.
- [9] O. Knecht: Zuverlässigkeit und Sicherheit von Kernkraftwerken. Atom und Strom, nr 1/1970 r.

- [10] J. Kaniewski: Sprawozdanie z udziału w spotkaniu Specjalistów Grupy Roboczej "NPPCJ" MAEA nt. Zabezpieczeń siłowni jądrowych. Kolonia - październik 1973 r.
- [11] J. Pollak, A. Nawrocki, Z. Jakubowski, J. Radzio: Sprawozdanie z wyjazdu służbowego do Czechosłowacji. EGU - Praga-lipiec 1975 r.
- [12] E. Doetsch, E. Kler, M. G. Schwarz: Prozessrechner im Kernkraftwerk. Siemens - Zeitschrift, nr 42/1968 r.
- [13] J. E. Smith, D. I. Morris: Prospects for Computer Control in Nuclear Power Plants. Technical Meeting, nr 6/6. Nuclex 69 r.
- [14] A. R. Cameron: The On-line Digital Computer System for the Dungeness "B" Nuclear Power Station /U.K/ - O. E. C. D. European Nuclear Energy Agency Seminar on the Application of On-line Computers to Nuclear Reactors. Norwegia - wrzesień 1968 r.
- [15] J. E. Lunde, K. Nefland, T. Palmgren, M. Overpeide: Process Computer Systems with high Reliability and Advanced Operator Communication Equipment for Nuclear Power Plant Application". Sympozjum - Praga - styczeń 1973 r.
- [16] J. D. Cummins, M. H. Butterfield: Application of Modern Control Theory in Nuclear Power. Sympozjum - Praga - styczeń 1973 r.

**mgr inż. STANISŁAW KISIELEWICZ**

**mgr inż. KRZYSZTOF KOWALSKI**

**mar inż. ANDRZEJ NAWROCKI**

**mgr inż. JAN RADZIO**

**mgr inż. TOMASZ STANKIEWICZ**

Institut Automatyki Systemów Energetycznych

Wrocław

## WŁASNOŚCI DYNAMICZNE BLOKU JĄDROWEGO WWER-440 UZYSKANE NA DRODZE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO

### Wstęp

Nakreślony w Polsce program rozwoju energetyki jądrowej stawia przed jego realizatorami szereg złożonych zadań z zakresu projektowania, wykonawstwa i montażu oraz eksploatacji bloków energetycznych z reaktorami jądrowymi. Podstawą powodzenia programu jest dobra znajomość konstrukcji bloku, głębokie rozumienie procesu technologicznego, własności eksploatacyjnych, problemów bezpieczeństwa i innych.

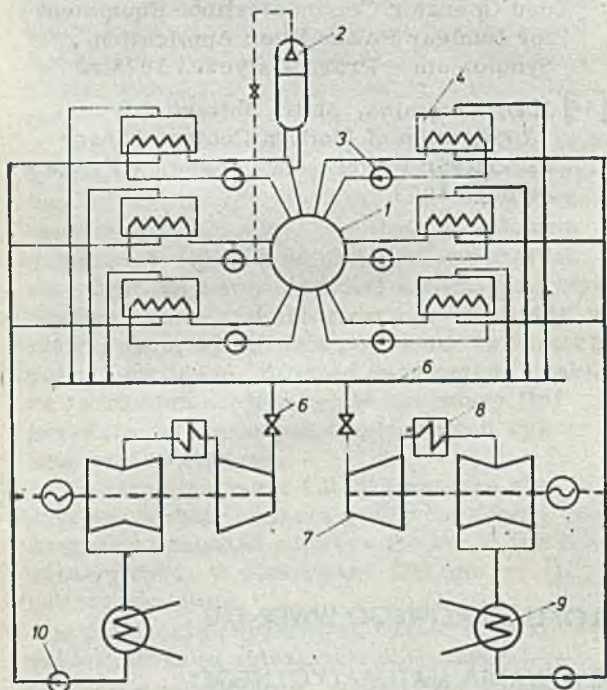
Jedną z dróg poznania obiektu jest badanie jego własności dynamicznych metodą modelowania matematycznego; w ten sposób można uzyskać wierny jakościowo obraz własności eksploatacyjnych, będących sumą zjawisk różnorodnej natury, składających się na określony proces technologiczny. Ocena wyników ilościowych uzyskanych z modelu, których dokładność w porównaniu z rzeczywistością zależy od przyjętego modelu zjawisk fizycznych i założeń upraszczających /założenia upraszczające pozwalają na uzyskanie odpowiedniego stopnia rozwiązywalności modelu/, jest funkcją celu, jakiemu model ma służyć.

Przedstawiony w pracy model jest podstawą do analitycznych badań układów regulacji /głównie układu regulacji mocy/ bloku jądrowego z reaktorem WWER-440, co zdeterminowało zasięg modelu i metodę rozwiązania, a także postać wyników. Model obejmuje podstawowy dla procesu wytwarzania energii elektrycznej układ cieplny bloku jądrowego. Poprzez odpowiednią dekompozycję obiektu wyodrębniono elementy strukturalne, opisane w przybliżeniu jednopunktowym zlinearyzowanymi równaniami różniczkowymi i algebraicznymi. Rozwiązania dla wybranych wejść i wyjść przedstawione są w postaci charakterystyk częstotliwościowych amplitudy i fazy oraz przebiegów czasowych.

### Opis bloku i założenia

Przedmiot modelu - układ cieplny EJ - przedstawiony jest na rys. 1. Energia cieplna, generowana w elementach paliwowych reaktora jądrowego podczas reakcji rozszczepiania jąder U235, przekazywana jest wodzie obiegu pierwotnego. Woda ta w sześciu równoległych pętlach /system rurociągów i pomp, kulacyjnych/ przepływa przez pęczki rurek grz w-

czych sześciu wytwornic pary, gdzie oddaje ciepło wodzie obiegu wtórnego, powodując przez jej podgrzanie i odparowanie produkcję pary nasyconej suchej. Para z wytwornic zbierana jest do wspólnego kolektora i następnie przechodzi przez układ łopatkowy turbiny, gdzie następuje zamiana energii cieplnej pary na energię mechaniczną wirnika. Skroplony kondensat podgrzany w układzie wymienników regeneracyjnych tłoczony jest pompami zasilającymi do wytwornicy pary.



Rys. 1. Schemat układu cieplnego EJ WWR-440: 1-reaktor, 2-stabilizator ciśnienia, 3 - pompa cyrkulacyjna, 4-wytwornica pary, 5-kolektor parowy, 6 - zawór regulacyjny, 7-turbina, 8-przegrzewacz pary, 9-kondensator, 10-pompa wody zasilającej

Dla bloku pracującego w pobliżu obciążenia nominalnego, badanie podstawowej własności - zdolności dopasowania stanu źródła energii /reaktora/ do zapotrzebowania mocy - można przeprowadzić pomijając wielopętliwość układu. Przyjęcie tego założenia uzasadnione jest tym, że dynamika rozkładu strumienia neutronów /a więc i dynamika rozkładu źródeł ciepła/, przy lokalnym zakłóceniu reaktywności już po dziesiątych częściach sekundy traci charakter zależności przestrzennej i staje się identyczna jak przy zakłóceniu reaktywnością równomiernie w całej objętości rdzenia o uśrednionym strumieniu neutronów [1]. Ponieważ z punktu widzenia dynamiki nieawaryjnych procesów cieplnych okres ułamka sekundy można pominąć, jest oczywiste, że przy istnieniu odpowiedniej symetrii w kompozycji układu technologicznego, reaktor stanowi dla każdej z sześciu pętli obiegu pierwotnego jednakowo wydajne źródło ciepła.

Z drugiej strony zmiana poboru mocy przejawia się jako zmiana obrotów turbiny. Zmianę

tę układ regulacji obrotów niweluje poprzez przemieszczenie zaworów regulacyjnych turbiny. Powoduje to jednakową zmianę ciśnienia w wytwornicach pary i dalej jednakowe procesy w pętłach obiegu I, a więc i w reaktorze.

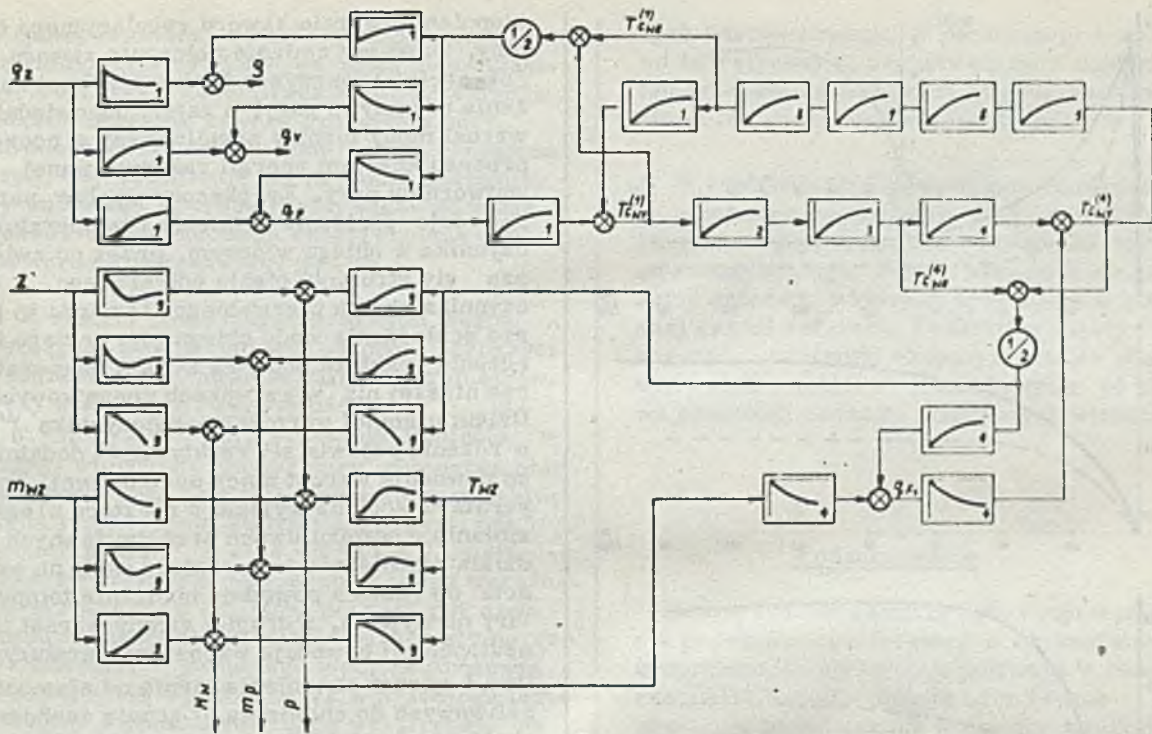
Ponadto w modelu pominięto szereg elementów i zależności /głównie w obiegu wtórnym/ takich, które nie mają wpływu na charakter dynamiki procesu, a zmieniają jedynie wartości parametrów charakteryzujących szybkość procesu i amplitudę zmian. Nie uwzględniono pojemności parowych /rurociągów, kolektorów i przegrzewacza międzystopniowego/, pominięto dynamikę turbiny, przyjmując, że jej moc jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływu pary, a więc do ciśnienia pary /zmianę entalpii pary w funkcji ciśnienia można pominąć/ przy niezmiennym położeniu zaworu regulacyjnego. Nie wprowadzono równań zależności temperatury wody zasilającej wytwornicę pary od stopnia podgrzania kondensatu w wymiennikach regeneracyjnych, a więc i od natężenia przepływu i parametrów pary przed turbiną. Rozbudowanie modelu o wymienione elementy nie przedstawia specjalnych merytorycznych trudności i jest przedmiotem bieżących prac IASE.

#### Opis modelu

Zjawiska zachodzące w opisanym wyżej układzie technologicznym ujęto w zestawie 33 równań głównych i pomocniczych: pełna lista równań wraz z użytymi w nich oznaczeniami podana jest na końcu pracy. Niżej będą omówione tylko zależności zasadnicze.

Kinetyka neutronów w przybliżeniu jednopunktowym z uwzględnieniem jednej uśrednionej grupy neutronów opóźnionych opisana jest równaniami /2/ i /3/. Równanie /4/ daje bilans składowych reaktywności, uwzględniający sprzężenie temperaturowe reaktywności paliwa i moderatora. Występująca w bilansie temperatura elementu paliwowego określona jest z równania przewodnictwa dla nieskończonego długiego elementu cylindrycznego z równomiernie rozłożonymi wewnętrznymi źródłami ciepła /5/. Współczynnik wymiany ciepła w równaniu /5c/ ujmuje wnikanie od koszulki elementu paliwowego do chłodziwa, przewodzenie koszulki i przewodzenie w szczelinie gazowej między koszulką a materiałem paliwowym. Równania /6/ i /9-16/ opisują dynamikę temperatury chłodziwa obiegu pierwotnego w poszczególnych odcinkach pętli /z wymianą ciepła i bez wymiany ciepła/. Strona wtórna wytwornicy pary opisana jest bilansem masy wody /17/ i masy pary /18/, bilansem energii /19/ i warunkiem stałości objętości wytwornicy /20/. Wpływ pary przyjęto proporcjonalny do stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego turbiny i do ciśnienia pary w wytwornicy /21/, natomiast strumień ciepła wymienianego między obiegiem pierwotnym i wtórnym obli-





Rys. 2. Schemat blokowy EJ WWR-440: 1-reaktor, 2,3-rurociąg /nitka gorąca/, 4-wytwornica pary str. I, 5, 6, 7-rurociąg /nitka zimna/, 8-komora zbiorcza, 9-wytwornica pary str. II

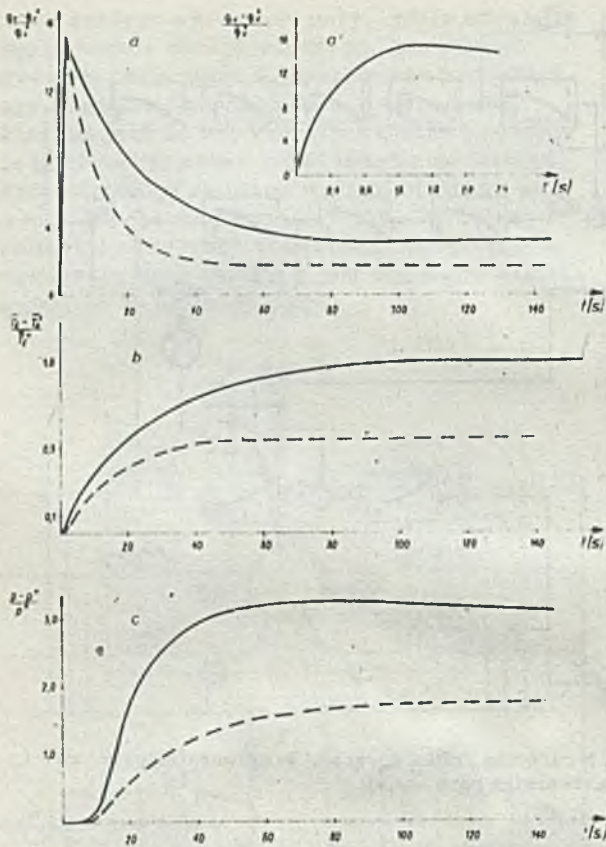
cza się z uwzględnieniem akumulacji ciepła w rurach grzejnych /24/. Zależności /25/, /26/, /27/ wyrażają założenie równowagi termodynamicznej czynnika obiegu wtórnego. Przy opisie stabilizatora ciśnienia przyjęto, że jest on wypełniony mieszaniną pary i wody w stanie nasycenia i że czynnik obiegu pierwotnego nie miesza się z czynnikiem stabilizatora, a jedynie podobnie do tłoka powoduje jego sprężanie lub rozprężanie. Obok działania stabilizującego ciśnienie poprzez załączanie grzałek elektrycznych lub uruchomienie wtysku wody bierze się pod uwagę wymianę ciepła między mieszaniną a ściankami stabilizatora, z uwzględnieniem zdolności akumulacyjnych ścianek /31/, /32/. Ilość czynnika zakłócającego równowagę w stabilizatorze ciśnienia obliczana jest z równania /33/, wyrażającego zmianę objętości wody obiegu pierwotnego w wyniku temperaturowych zmian gęstości.

Na rysunku 2 przedstawiony jest syntetyczny schemat blokowy układu, ilustrujący powiązania i zależności ujęte modelem. W bloki schematu wrysowane są przybliżone charakterystyki czasowe odpowiednich podukładów. W oparciu o omówiony schemat dla przyjętego układu równań ułożono program w języku FORTRAN na EMC ODRA 1325. Obliczono charakterystyki częstotliwościowe i przebiegi czasowe szeregu wielkości wyjściowych dla zakłóceń: zewnętrzna zmiana reaktywności i zmiana położenia zaworu regulacyjnego turbiny przy dwóch wartościach współczynnika temperaturowego sprężenia reaktywności

moderatora, odpowiadających w przybliżeniu początkowi i końcowi kampanii paliwowej. Wyniki obliczeń dla niektórych parametrów układu /istotnych dla analizy układu regulacji mocy bloku/ przedstawione są na rys. 3 i 4. Linia ciągłą oznaczone są przebiegi czasowe dla  $\beta_c = -1,7 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]$ , a linia przerywaną przebiegi dla  $\beta_c = -3,4 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]$ . Na osi rzędnych wykresów odłożone są względne odchylenia parametru "x" od jego wartości w warunkach początkowych "x<sup>0</sup>".

#### Dyskusja wyników

Po wprowadzeniu w reaktorze zakłócenia przez skokową zmianę reaktywności następuje szybki wzrost mocy neutronowej./rys. 3a/ przy stosunkowo szybkim wzroście temperatury paliwa i dużo wolniejszym wzroście średniej temperatury chłodziwa /rys. 3b/. W wyniku takiego kierunku zmian temperatur pojawiają się narastające ujemne składowe reaktywności, które w pewnym momencie kompensują dodatnią reaktywność zakłócenia. W tym stanie moc neutronowa osiąga maksimum /rys. 3a'/ . Należy zwrócić uwagę, że skompensowanie reaktywności do zera odbyło się głównie dzięki wzrostowi temperatury paliwa; temperatura chłodziwa z powodu dużej cieplnej inercyjności wody i dużego oporu w przekazywaniu ciepła od elementu paliwowego do chłodziwa, wzrosła nieznacznie. W miarę dalszego wzrostu temperatury chłodziwa przeważają ujemne składowe reaktywności, co wyraża się obniżaniem mocy neutronowej. Wpraw-

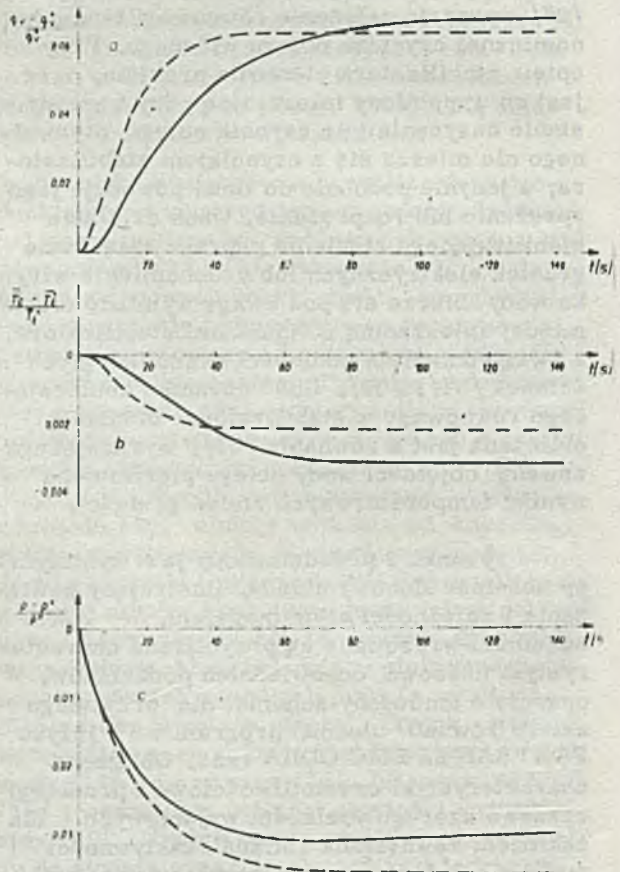


Rys. 3. Przebiegi czasowe dla zakłócenia  $z(t) = 0,1 \times 1(t)$

dzie temperatura wody w dalszym ciągu rośnie, to jednak dzięki obniżaniu się temperatury paliwa /spada intensywność źródeł ciepła/ bilans składowych reaktywności znów zdąży do zera, powodując stabilizację mocy na nowym poziomie. Na wykresie 3c, przedstawiającym przebieg zmian ciśnienia pary w wytwornicy pary, widać kilkusekundowe opóźnienia transportowe odpowiadające czasowi przepływu czynnika obiegu pierwotnego od reaktora do wytwornicy. W rurkach grzewczych wytwornicy znajduje się czynnik o temperaturze wyższej niż w warunkach początkowych; powoduje to wzrost strumienia ciepła wymienianego z czynnikiem wtórnym, a za tym wzrost produkcji pary. Efektem tego procesu jest wzrost ciśnienia w wytwornicy i w konsekwencji wzrost natężenia wypływu pary. Z drugiej strony wzrostowi ciśnienia towarzyszy wzrost temperatury czynnika /temperatura nasycenia/, powodując zmniejszenie i dalej stabilizację strumienia energii wymienianej między obiegami, a w konsekwencji - zmniejszenie stopnia schłodzenia czynnika pierwotnego w wytwornicy pary. Ponięważ moc turbiny jest proporcjonalna do natężenia przepływu pary, a zatem do ciśnienia w wytwornicy, to przy nie zmienionym położeniu zaworu regulacyjnego przebieg mocy turbiny jest identyczny z przebiegiem ciśnienia /przy pominięciu zależności entalpii pary od ciśnienia/.

Na rys. 4 pokazano przebiegi czasowe wymienionych wyżej wielkości dla zakłócenia

stopniem otwarcia zaworu regulacyjnego turbiny. Skokowej zmianie położenia zaworu /otwarcia/ towarzyszy skokowy wzrost natężenia przepływu pary, a zatem odpowiedni wzrost mocy turbiny zrealizowany w początku procesu kosztem energii zakumulowanej w wytwornicy pary. Zwiększony wypływ pary powoduje obniżenie ciśnienia i temperatury czynnika w obiegu wtórnym, przez co zwiększa się strumień ciepła odbieranego od czynnika obiegu pierwotnego. Oznacza to głębsze schłodzenie wody obiegu pierwotnego i do rdzenia reaktora dopływa woda o temperaturze niższej niż w warunkach początkowych. Dzięki ujemnej wartości współczynnika  $\gamma_c$  w rdzeniu pojawia się reaktywność dodatnia, co powoduje wzrost mocy neutronowej. Temperatura wody na wyjściu z reaktora ulega zmianie w wyniku dwóch przeciwstawnych działań: obniżenie temperatury wody na wejściu do rdzenia powoduje obniżenie temperatury na wyjściu, z drugiej strony wzrost mocy neutronowej powoduje wzrost temperatury paliwa i wzrost strumienia ciepła od elementów paliwowych do chłodziwa. Łącznie zachodzi obniżenie średniej temperatury chłodziwa obiegu pierwotnego, co w konsekwencji hamuje początkowy wzrost strumienia ciepła wymienianego w wytwornicy pary. Proces ten trwa tak długo, aż różnica temperatur na wyjściu i wejściu reaktora /proporcjonalna do mocy



Rys. 4. Przebiegi czasowe przy zakłóceniu  $z(t) = 0,1 \times 1(t)$

cieplnej reaktora/ ustali się na poziomie odpowiadającym ustalonej wartości mocy turbiny, reprezentowanej przez sumę przebiegów stopnia otwarcia zaworu i ciśnienia pary. Równocześnie średnia temperatura chłodziwa /rys. 4b/ stabilizuje się na takim poziomie, by wniesiona tą drogą reaktywność dodatnia została skompensowana reaktywnością ujemną od wzrostu temperatury paliwa.

Z analizy omówionych krzywych można wyciągnąć pewne wnioski odnośnie szybkości i zakresu zmian poszczególnych parametrów. Przy zakłóceniu reaktywności dla  $\delta_c = -1,7 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]$  przebiegi ciśnienia w obiegu wtórnym i temperatury chłodziwa obiegu pierwotnego charakteryzują się w przybliżeniu jednakowymi stałymi czasowymi /ok. 30 s/ natomiast dla  $\delta_c = -3,4 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{K} \right]$  stała czasowa przebiegu temperatury ulega wyraźnemu skróceniu /o ok. 40%/ podczas gdy stała czasowa przebiegu ciśnienia skraca się bardzo nieznacznie. W przebiegu mocy neutronowej przejawia się - podobnie jak w przebiegu temperatury - stosunkowo duża wrażliwość na zmianę wartości współczynnika temperaturowego sprzężenia reaktywności. Różnice w zakresie zmian  $\bar{T}_c$  dla różnych wartości  $\delta_c$  wynikają z warunku bilansu reaktywności dla nowego stanu ustalonego, natomiast fakt, że istnieje wyraźna różnica w szybkości zbilansowania reaktywności, przejawia się w stabilizowaniu mocy neutronowej oraz ciśnienia /a więc i mocy turbiny/ na różnych poziomach, zależnych od  $\delta_c$ .

Przy zakłóceniu zmianą stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego turbiny, przebiegi ciśnienia można scharakteryzować stałą czasową ok. 20 s dla obu wartości współczynnika  $\delta_c$ . W przebiegu temperatury chłodziwa, podobnie jak dla przypadku poprzedniego, w sposób zdecydowany obserwuje się skrócenie stałej czasowej przy wzroście współczynnika  $\delta_c$ . Powyższe odnosi się również do stałej czasowej przebiegu mocy neutronowej. Jest to efekt zgodny z intuicyjną interpretacją procesu; zmiana intensywności sprzężenia zwrotnego przejawia się wyraźniej w tych ogniwach procesu, które są silniej związane /są bliższe/ z miejscem działania sprzężenia zwrotnego.

Oceniając wiarygodność omówionych wyników przeanalizowano je na tle dostępnych da-

nych literaturowych. W porównaniu z wynikami teoretycznymi uzyskiwanymi z modeli matematycznych o podobnym stopniu zaawansowania stwierdzono zadowalającą zgodność.

W konfrontacji z przebiegami zmierzonymi na obiekcie rzeczywistym [2] zauważa się, że obliczony proces przejściowy jest krótszy od rzeczywistego. Jest to niewątpliwie efekt sumy założeń, o których była mowa w pierwszej części referatu. Dodatkowo należy zaznaczyć, że wyniki eksperymentalne otrzymane są dla zakłóceń nieskokowych, co różniwa przebiegi czasowe mierzonych wielkości.

### Podsumowanie

Zamierzeniem autorów było rozpowszechnienie podstawowej informacji o własnościach dynamicznych elektrowni jądrowej z reaktorem WWER-440, celowe więc będzie podkreślenie zasadniczych wniosków wynikających ze zreferowanego materiału.

- Energetyczny blok jądrowy z reaktorem wodno-ciśnieniowym i obiegiem wtórnym na parę nasyconą wykazuje własności samostabilizacji zarówno przy zakłóceniu reaktywności, jak i stopniem otwarcia zaworu regulacyjnego turbiny.
- Przy zakłóceniu ze strony poboru mocy przez sieć następuje samoczynne dostosowanie mocy bloku do zapotrzebowania.
- Czas trwania procesu przejściowego zamyka się praktycznie w granicach 2-3 min, co świadczy o wygodnych własnościach regulacyjnych obiektu.
- W trakcie kampanii paliwowej następuje płynna zmiana wartości stałych czasowych i zakresów zmian poszczególnych parametrów układu cieplnego; fakt ten powinien być uwzględniony przy projektowaniu układów regulacji mocy bloku.
- Blok jądrowy z reaktorem wodno-ciśnieniowym wykazuje znacznie lepsze własności regulacyjne w porównaniu z blokami cieplnymi lub jądrowymi innych typów i może efektywnie pracować w układzie regulacji mocy i częstości systemu energetycznego.

### Literatura

- [1] P. T. Potapenko - Prostranstwienno-zawisimaja pieredatocznaja funkcja jadernogo reaktora. Uprawlenije jadernymi energetycznymi ustanowkami. Wypusk 4. Atomizdat, Moskwa 1970.
- [2] W. B. Winogradow - Dinamiczeskije charakteristiki bloka s reaktorom tipa WWER-440. Elektriceskije stancji, 10, 1974.

Reaktor

$$q_v = A \cdot n \quad |1|$$

$$\frac{dn}{dt} = n \cdot \frac{\beta - \beta}{l} + \lambda \cdot C \quad |2|$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{l} n - \lambda C \quad |3|$$

$$S = S_z + \gamma_f \Delta \bar{T}_f + \gamma_c \Delta \bar{T}_c^{(4)} \quad |4|$$

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} - \frac{c_f S_f}{\lambda_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda_f} q_v \quad |5|$$

Warunki brzegowe równania (5)

$$T_f|_{r=0} \neq \infty \quad |5a|$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial r}|_{r=0} = 0 \quad |5b|$$

$$-\frac{\partial T_f}{\partial r}|_{r=r_f} = \frac{k}{\lambda_f} (T_f|_{r=r_f} - \bar{T}_c^{(4)}) \quad |5c|$$

$$\frac{d}{dt} (M_c^{(4)} C_c T_c^{(4)}) = m_{cwe}^{(4)} C_c T_{cwe}^{(4)} - m_{cwy}^{(4)} C_c T_{cwy}^{(4)} + q_{vF} F \quad |6|$$

$$\bar{T}_c^{(4)} = \frac{T_{cwe}^{(4)} + T_{cwy}^{(4)}}{2} \quad |7|$$

$$\bar{T}_f \cong \int_0^{r_f} r T_f(r) dr \quad |8|$$

$$q_{vF} = -\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial r}|_{r=r_f} \quad |9|$$

Rurociągi i komory zbiorcze obiegu pierwotnego

$$\frac{d}{dt} (M_c^{(j)} C_c T_c^{(j)}) = m_{cwe}^{(j)} C_c T_{cwe}^{(j)} - m_{cwy}^{(j)} C_c T_{cwy}^{(j)} \quad |10+13|$$

Wytwornica pary

$$\frac{d}{dt} (M_c^{(4)} C_c T_c^{(4)}) = m_{cwe}^{(4)} C_c T_{cwe}^{(4)} - m_{cwy}^{(4)} C_c T_{cwy}^{(4)} - q_{vF_2} F_2 \quad |16|$$

$$\frac{dM_w}{dt} = m_{wz} - m_{wp} \quad |17|$$

$$\frac{dM_p}{dt} = m_{pp} - m_p$$

| 18 |

$$\frac{d(M_w i^i)}{dt} = m_{wz} i_{wz} - m_{pp} i'' + q_{F_I} F_I$$

| 19 |

$$V_w + V_p = \text{const}$$

| 20 |

$$m_p = p z$$

| 21 |

$$q_{F_I} = k_I (\bar{T}_c^{(4)} - T_r)$$

| 22 |

$$q_{F_{II}} = k_{II} (T_r - T_n)$$

| 23 |

$$M_r C_r \frac{dT_r}{dt} = q_{F_I} F_I - q_{F_{II}} F_{II}$$

| 24 |

$$T_n = f_1(p)$$

| 25 |

$$i^i = f_2(p)$$

| 26 |

$$i'' = f_3(p)$$

| 27 |

### Stabilizator ciśnienia

$$\frac{d}{dt} (M_s i_s) = q_g + m_{sp} i_{sp}$$

| 28 |

$$\frac{dM_s}{dt} = m_{sp}$$

| 29 |

$$\frac{d}{dt} (M_s v_s) = -m_1 v_1$$

| 30 |

$$Q_s = k_s F_s (T_{rs} - T_n)$$

| 31 |

$$C_{rs} \frac{dT_{rs}}{dt} = -k_s F_s (T_{rs} - T_n)$$

| 32 |

$$m_1 = - \sum_{j=1}^N V^{(j)} \left( \frac{dS_c^{(j)}}{dT_c^{(j)}} \right) \frac{dT_c^{(j)}}{dt}$$

| 33 |

Lista oznaczeń

- $A$  - współczynnik proporcjonalności  
 $C_c$  - ciepło właściwe chłodziwa  
 $C_f$  - ciepło właściwe elementu paliwowego  
 $C_r$  - ciepło właściwe rurek grzewczych wyltwornicy pary  
 $C$  - koncentracja jąder generujących neutrony opóźnione  
 $C_{r,s}$  - pojemność cieplna ścian stabilizatora  
 $F$  - powierzchnia wymiany ciepła w reaktorze  
 $F_s$  - powierzchnia wymiany ciepła w stabilizatorze ciśnienia  
 $F_{I,II}$  - powierzchnie wymiany ciepła w wyltwornicy pary  
 $i'$  - entalpia wody nasyconej  
 $i''$  - entalpia pary nasyconej  
 $i_g$  - entalpia mieszaniny parowo-wodnej  
 $i_{sp}$  - entalpia wody wtryskiwanej do stabilizatora ciśnienia  
 $i_{wz}$  - entalpia wody zasilającej wyltwornicę pary  
 $K, K_I, K_{II}, K_3$  - współczynniki przenikania ciepła  
 $L$  - czas życia neutronów natychmiastowych  
 $m_{cwe}^{(j)}$  - natężenie przepływu chłodziwa wpływającego do jego elementu  
 $m_{cwy}^{(j)}$  - natężenie przepływu chłodziwa wypływającego z jego elementu  
 $m_p$  - natężenie przepływu pary wypływającej z wyltwornicy  
 $m_{pp}$  - natężenie przepływu pary produkowanej w wyltwornicy  
 $m_{sp}$  - natężenie przepływu wody wtryskiwanej do stabilizatora ciśnienia  
 $m_1$  - natężenie przepływu wody wpływającej do stabilizatora ciśnienia z obiegu I  
 $M_c^{(j)}$  - masa chłodziwa w obrębie jego elementu  
 $M_p$  - masa pary w wyltwornicy pary  
 $M_r$  - masa rurek grzewczych wyltwornicy pary  
 $M_s$  - masa mieszaniny parowo-wodnej w stabilizatorze ciśnienia  
 $M_w$  - masa wody po stronie wtórnej wyltwornicy pary  
 $n$  - gęstość neutronów  
 $\rho$  - ciśnienie w wyltwornicy pary str. II  
 $Q_f$  - strumień ciepła w reaktorze  
 $Q_g$  - moc grzałek w stabilizatorze ciśnienia  
 $Q_{\pi, q_{FII}}$  - strumienie ciepła w wyltwornicy pary  
 $Q_v$  - gęstość źródeł ciepła w elemencie paliwowym  
 $Q_s$  - strumień ciepła mieszanina - ściana w stabilizatorze ciśnienia  
 $r_f$  - promień elementu paliwowego  
 $\bar{T}_c^{(j)}$  - średnia temperatura chłodziwa w obrębie  $j$ -ego elementu  
 $T_{cwe}^{(j)}$  - temperatura chłodziwa wpływającego do  $j$ -ego elementu  
 $T_{cwy}^{(j)}$  - temperatura chłodziwa wypływającego z  $j$ -ego elementu  
 $T_f$  - temperatura elementu paliwowego  
 $\bar{T}_f$  - średnia temperatura elementu paliwowego  
 $T_n$  - temperatura nasycenia  
 $T_r$  - temperatura rurek grzewczych wyltwornicy pary  
 $T_{rs}$  - temperatura ścian stabilizatora ciśnienia  
 $V_s$  - objętość właściwa mieszaniny parowo-wodnej w stabilizatorze ciśnienia  
 $V_1$  - objętość właściwa wody wpływającej do stabilizatora ciśnienia  
 $V^{(j)}$  - objętość  $j$ -ego elementu  
 $V_w, V_p$  - objętość wody i pary w wyltwornicy pary  
 $Z$  - stopień otwarcia zaworu  
 $\beta$  - sumaryczny udział neutronów opóźnionych  
 $\delta_c$  - temperaturowy współczynnik reaktywności moderatora  
 $\delta_f$  - temperaturowy współczynnik reaktywności paliwa  
 $\lambda$  - stała rozpadu jąder C  
 $\lambda_f$  - przewodność cieplna elementu paliwowego  
 $\rho$  - reaktywność  
 $\rho_c^{(j)}$  - gęstość chłodziwa w obrębie jego elementu  
 $\rho_f$  - gęstość materiału elementu paliwowego  
 $\rho_z$  - reaktywność zewnętrzna  
 $\Delta$  - odchylenie parametru od wartości w stanie ustalonym  
 $x^0$  - wartość parametru "x" w stanie ustalonym

inż. STANISŁAW KNORR

Instytut Automatyki Systemów Energetycznych  
Wrocław

mgr inż. JAN NIECKARZ

„Energopomiar”  
Gliwice

## ANALIZA WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH DLA APARATURY DO POMIARÓW CIEPLNYCH I REGULACJI ORAZ PRZYGOTOWANIE APARATURY REGULACYJNEJ DLA POTRZEB ELEKTROWNI JĄDROWYCH

### 1. Warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej w elektrowni jądrowej

Wymagania środowiskowe stawiane aparaturze pomiarowo-regulacyjnej w elektrowniach jądrowych są znacznie bardziej zróżnicowane niż w elektrowniach cieplnych konwencjonalnych. Oprócz zwykłych wpływów środowiska na aparaturę, tzn. zmian temperatury, wilgotności i ciśnienia powietrza oraz drgań mechanicznych, w elektrowniach jądrowych występują dodatkowe wpływy wynikające ze specyfiki procesu technologicznego, a mianowicie: wpływ promieniowania jądrowego oraz wpływ kwasu borowego, zawartego w wodzie obiegu pierwotnego. Nie występuje natomiast zapylenie.

Elektrownię jądrową z reaktorem PWR można podzielić na cztery strefy, w których warunki środowiskowe dość wyraźnie się różnią. Są to:

- budynek reaktora,
- budynek pomocniczy,
- maszynownia,
- nastawnia i pomieszczenia przyległe,

W budynkach: reaktora i pomocniczym mieszczą się instalacje i urządzenia obiegu pierwotnego, w maszynowni - obiegu wtórnego. W nastawni i pomieszczeniach przyległych instalowana jest aparatura kontrolna i regulacyjna części centralnej układów automatyki, zabezpieczeń itp.

Poniżej przedstawiono szczegółowo warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej, panujące w wymienionych strefach elektrowni jądrowej.

#### Warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej instalowanej w budynku reaktora

Warunki środowiskowe w budynku reaktora są najbardziej niekorzystne dla aparatury, zarówno w czasie normalnej pracy bloku jądrowego, jak i w przypadku wystąpienia awarii. Najgroźniejszy jest przypadek pęknięcia ru-

ciągu obiegu pierwotnego powodujący ucieczkę chłodziwa.

Wartość parametrów otoczenia w szczelnym budynku reaktora zestawiono w tabeli 1.

Dobierając aparaturę pomiarowo-regulacyjną instalowaną w budynku reaktora należy uwzględnić następujące warunki otoczenia:

- Temperatura otoczenia w budynku reaktora w czasie normalnej pracy bloku jest bardzo wysoka. Dla elektrowni jądrowej z reaktorem WWER-440 zakłada się stabilizację temperatury na wartości ok.  $50^{\circ}\text{C}$ . Ze względu na dużą pojemność budynku możliwy jest miejscowy wzrost temperatury do ok.  $80^{\circ}\text{C}$ ;

- Wilgotność względna powietrza w budynku reaktora może wynieść 100%. W połączeniu z wysoką temperaturą stwarza to tropikalne warunki pracy dla aparatury;
- W czasie normalnej pracy bloku w budynku utrzymywane jest podciśnienie. W niektórych elektrowniach USA utrzymywane jest ciśnienie ok. 0,7 ata;

- Zakres możliwych częstotliwości drgań mechanicznych w budynku reaktora wynosi 0 - 400 Hz. Największy udział mają drgania o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie ok.  $40\ \mu\text{m}$  / przyspieszenie 0,6 g/;

- Moc dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$  może osiągać wartości 0,1-250 R/h na powierzchniach rurociągów obiegu pierwotnego. W boksach aparatury wartości te będą znacznie mniejsze. Ze względu jednak na udowodniony wpływ promieniowania  $\gamma$  na własności materiałów m. in. na zmiany własności półprzewodników i materiałów izolacyjnych, oraz długotrwałe przebywanie aparatury w polu promieniowania, należy brać pod uwagę odporność aparatury na działanie promieniowania;
- W przypadku awarii spowodowanej pęknięciem rurociągu obiegu pierwotnego warunki środowiskowe w budynku reaktora wyraźnie pogarszają się. Według wstępnych obliczeń wykonanych w kraju dla elektrowni jądrowej WWER-440 ciśnienie wzrośnie do wartości ok. 2,55, ata a temperatura do wartości temperatury nasycenia ok.  $124^{\circ}\text{C}$ . Obliczenia te nie uwzględniają ewentualnego zastosowania ukła-

Wartości parametrów otoczenia w szczelnym budynku reaktora

Lp.	Parametr	Wymiar	Praca normalna bloku	Praca awaryjna bloku /pęknięcie rurociągu obiegu pierwotnego/
1.	Temperatura powietrza	°C	45-80	124/temp. nasycenia/
2.	Wilgotność względna powietrza	%	100	100
3.	Ciśnienie powietrza	ata	0,6-0,8	2,55
4.	Drgania mechaniczne - amplituda - częstotliwość	m Hz	40 0-400	40 0-400
5.	Promieniowanie jądrowe: - moc dawki ekspozycyjnej prom.	R/h	0,1-250	$1,45 \times 10^6$

dów redukcyjnych. Według założeń radzieckich z 1973 r., przy zastosowaniu kondensatorów wodnych, talerzowych ciśnienie w wyniku awarii nie przekroczy 1,7 ata, a temperatura 115°C;

- Przy pęknięciu rurociągu obiegu pierwotnego do przestrzeni budynku reaktora przedostaną się promieniotwórcze produkty rozszczepień, które spowodują gwałtowny wzrost mocy dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$ . Dla bloku o mocy porównywalnej z mocą bloku WWER-440 - elektrownia jądrowa Ginna o mocy 470 MWe - jej wartość szacuje się na  $1,45 \times 10^6$  R/h przez kilka godzin od momentu wystąpienia awarii. Dla bloków o mocy 1200 MWe przewidywana wartość mocy dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$  jest większa i wynosi  $4,2 \times 10^6$  R/h.

Oprócz tego należy pamiętać, że czujniki pomiarowe instalowane na obiegu pierwotnym stykają się z czynnikami, w których znajdują się aktywne produkty rozszczepień oraz kwas borowy. Ich oddziaływanie powoduje zwiększoną podatność materiałów na korozję. Z tego względu elementy czujników pomiarowych,

stykające się z mierzonymi czynnikami, muszą być wykonane ze stali nierdzewnej /osłony termoelementów, mieszki, przepony/. Doświadczenia zachodnie wskazują, że w niektórych przypadkach do konstrukcji cienkościennych osłon termoelementów należy stosować specjalne gatunki stali nierdzewnych, np. stal stabilizowaną niobem.

Warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej instalowanej w budynku pomocniczym.

Warunki środowiskowe w budynku pomocniczym są łagodniejsze niż w budynku reaktora, jednak i tutaj wartości niektórych parametrów stanowią znaczne zagrożenie dla aparatury.

Wartości parametrów otoczenia w budynku pomocniczym zestawiono w tabeli 2.

Z podanych w tabeli 2 wartości parametrów wynikają następujące uwagi, dotyczące warunków pracy aparatury pomiarowo-regulacyjnej w budynku pomocniczym:

Tabela 2

Wartości parametrów otoczenia w budynku pomocniczym

Lp.	Parametr	Wymiar	Praca normalna bloku	Praca awaryjna bloku /pęknięcie rurociągu obiegu pierwotnego/
1.	Temperatura powietrza	°C	50	50
2.	Wilgotność względna powietrza	%	90	90
3.	Ciśnienie powietrza	-	atmosferyczne	atmosferyczne
4.	Promieniowanie jądrowe: - moc dawki ekspozycyjnej prom.	R/h	brak	$1,45 \times 10^4$



- Wartości temperatury, wilgotności względnej i ciśnienia powietrza otaczającego nie zależą od stanu pracy bloku jądrowego;
- Temperatura otoczenia jest równa ok. 50°C, podobnie jak w czasie normalnej pracy bloku w budynku reaktora. Wilgotność względna jest nieco niższa i wynosi ok. 90%;
- Ciśnienie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, ponieważ budynek pomocniczy nie jest szczelny;
- W czasie normalnej pracy bloku promieniowanie jądrowe w zasadzie nie występuje. Natomiast w przypadku pęknięcia rurociągu obiegu pierwotnego moc dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$  może osiągnąć znaczną wartość. Ocenia się ją na 1% mocy dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$  w budynku reaktora. Wobec tego dla elektrowni jądrowej WWER-440 wyniesie ona ok.  $1,45 \times 10^4$  R/h, a dla elektrowni o mocy 1200 MWe /zbliżona do WWER-1000/ -  $4,2 \times 10^4$  R/h;
- Czujniki pomiarowe instalowane na rurociągach i urządzeniach w budynku pomocniczym

Wartości parametrów otoczenia w maszynowni zestawiono w tabeli 3.

Z przytoczonych danych wynika, że dobierając aparaturę pomiarowo-regulacyjną instalowaną na obiegu wtórnym w maszynowni, można stosować podobne kryteria doboru aparatury w zakresie wymagań środowiskowych, jak dla elektrowni konwencjonalnych. Maksymalna zaobserwowana w elektrowniach typu PWR moc dawki ekspozycyjnej promieniowania  $\gamma$ , w przypadkach nieszczelności w wytwornicach pary przy których możliwe jest jeszcze prowadzenie bloku, wynosi ok. 2 R/h na powierzchniach rurociągów obiegu wtórnego. Taki wpływ promieniowania może być pominięty. Pominięty może być również wpływ niewielkiej ilości kwasu borowego, który może znaleźć się w obiegu wtórnym. Dlatego wystarczające będą w zasadzie zabezpieczenia antykorozyjne czujników pomiarowych, stosowane zwykle w elektrowniach konwencjonalnych.

Tabela 3

Wartości parametrów otoczenia w maszynowni

Lp.	Parametr	Wymiar	Praca normalna bloku	Praca awaryjna bloku /nieszczelności w wytwornicach pary/
1.	Temperatura powietrza	°C	50	50
2.	Wilgotność względna powietrza	%	80	80
3.	Ciśnienie powietrza	-	atmosferyczne	atmosferyczne
4.	Drgania mechaniczne - amplituda - częstotliwość	m Hz	5+ 60 25 lub 50	5+ 60 25 lub 50
5.	Promieniowanie jądrowe: - moc dawki ekspozycyjnej prom.	R/h	brak	2

powinny być wykonane, podobnie jak czujniki w budynku reaktora, z materiałów o wyższej odporności na korozję.

#### Warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej instalowanej w maszynowni

W maszynowni zainstalowane są urządzenia obiegu wtórnego elektrowni jądrowej PWR z wyjątkiem wytwornic pary. Warunki środowiskowe dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej nie różnią się zasadniczo od warunków spotykanych w elektrowniach konwencjonalnych. Jedyną istotną różnicę stanowi możliwość przedostawania się produktów rozpadu promieniotwórczego i kwasu borowego do wody obiegu wtórnego, w przypadku powstania nieszczelności w wytwornicach pary. Pojawia się wówczas na powierzchniach rurociągów promieniowania  $\gamma$ .

#### Warunki środowiskowe dla aparatury kontrolno-regulacyjnej instalowanej w nastawni i pomieszczeniach przyległych

Dla elektrowni jądrowej WWER przewiduje się klimatyzację nastawni i pomieszczeń przyległych. Dlatego warunki środowiskowe dla aparatury kontrolno-regulacyjnej powinny być zbliżone do nominalnych. Ze względu na brak założeń projektowych dla układu klimatyzacji nastawni w elektrowni WWER-440, do oceny warunków pracy aparatury przyjęto założenia stosowane w elektrowniach konwencjonalnych. Założenia te podano w tabeli 4 dla dwóch okresów klimatycznych o różnej temperaturze powietrza  $t_z$  na zewnątrz.

Należy zaznaczyć, że w nastawni i pomieszczeniach przyległych promieniowanie jądrowe praktycznie nie występuje.

## Założenia dla układu klimatyzacji nastawni

Lp.	Parametr	Wymiar	Okres zimowy $t_z$ 10°C	Okres letni $t_z$ 10°C
1.	Temperatura powietrza	°C	20 $\pm$ 2	22 $\pm$ 2
2.	Wilgotność względna powietrza	%	45 $\pm$ 3	50 $\pm$ 3
3.	Ciśnienie powietrza	-	małe nadciśnienie	małe nadciśnienie

Z omówionego zestawienia warunków środowiskowych dla aparatury pomiarowo-regulacyjnej w elektrowniach jądrowych wynikają zróżnicowane wymagania stawiane tej aparaturze.

Wymagania środowiskowe dla aparatury instalowanej w maszynowni na obiegu wtórnym oraz w nastawni i pomieszczeniach przyległych nie odbiegają od wymagań dla aparatury w elektrowniach konwencjonalnych. Natomiast wymagania dla aparatury instalowanej w budynkach reaktora i pomocniczym na obiegu pierwotnym muszą być znacznie zaostrzone. Dotyczy to całej aparatury instalowanej na urządzeniach i instalacjach w tych budynkach, zwłaszcza zaś aparatury przewidzianej do pracy w przypadku najgroźniejszej awarii spowodowanej pęknięciem rurociągu obiegu pierwotnego i ucieczką chłodziwa.

Dlatego też przy projektowaniu i przygotowywaniu aparatury dla obiegu pierwotnego elektrowni jądrowych, należy zwrócić uwagę zarówno na trwałość i niezawodność jak i na własności eksploatacyjne aparatury w bardzo niekorzystnych warunkach środowiskowych. Należy przy tym również pamiętać o zróżnicowaniu wymagań dotyczących własności eksploatacyjnych, w zależności od "ważności" układu.

## 2. Nowa aparatura regulacyjna dla potrzeb elektrowni jądrowych

Wytwarzanie energii elektrycznej w elektrowniach ciepłych z reaktorami jądrowymi wymaga stosowania układów pomiarów i regulacji o dużym stopniu niezawodności. Uzyskuje się to w głównej mierze przez optymalny dobór struktur układów tworzonych w oparciu o konwencjonalną aparaturę o określonych funkcjach /przetworniki, regulatory itp/.

Tworzenie struktur układów o dużym stopniu niezawodności ma dwa zasadnicze cele: znaczne zwiększenie bezawaryjnego czasu pra-

cy bloku oraz zapobieżenie stanom niebezpiecznym dla obiektu.

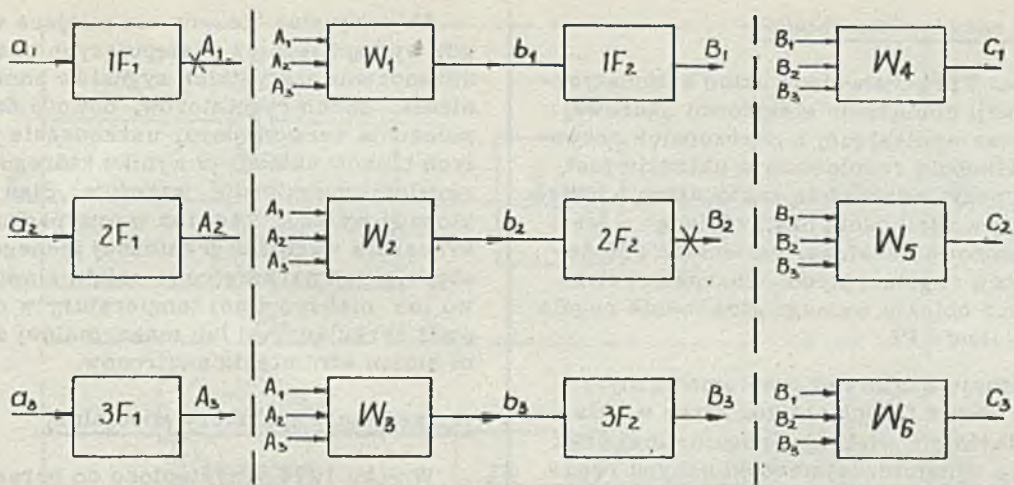
Niezawodność struktury uzyskuje się stosując następujące środki:

- redundancję z automatycznym wyborem poprawnych sygnałów analogowych i operowanie w miarę możliwości przesyłowym sygnałem o wartości średniej z jednoznacznych sygnałów poprawnych;
- zwielokrotnienie pomiaru parametrów mających wpływ na bezpieczną pracę obiektu i wybór wartości ekstremalnych, kontrolę przekroczenia dopuszczalnych wartości przez określone parametry;
- objęcie blokadami działania określonych członów wykonawczych.

## Układy z redundancją i automatycznym wyborem poprawnych wartości

Układ redundancyjny zawiera większą ilość elementów lub członów niż to wynika z potrzeb fizycznych kontroli procesu, co stwarza możliwość wyeliminowania urządzeń niesprawnych bez zakłócenia funkcji podstawowej realizowanej przez układ. Układy te znacznie zwiększają koszty budowy oraz ogólną objętość aparatury i dlatego powinny być stosowane tylko w szczególnie odpowiedzialnych obwodach pomiarów i regulacji, głównie w obrębie aparatury informującej o stanie obiektu. Istotną korzyścią wynikającą ze stosowania tych układów zamiast układów prostszych jest znaczne wydłużenie odstępu czasu między postojami bloku /spowodowanymi awariami aparatury warunkującymi ciągłość ruchu/ niż miałyby to miejsce w przypadku układów prostych. Efekt ten występuje mimo zwiększonej, ze względu na ilość aparatury, częstości napraw i pracochłonności prac konserwacyjnych. Równocześnie większość uszkodzeń można usunąć w trakcie pracy obiektu.

Najbardziej powszechny jest redundancyjny system trójtorowy. Fragment takiego w pełni rozwiniętego systemu przedstawia rys. 1. W układzie tym przypadek równoczesnego uszkodzenia po jednym dowolnym z każdego typu aparatów /lub w jego obwodach zewnętrznych/, znajdujących się przed każdą potrójną



Rys. 1. Trójtorowy układ redundancyjny. W - aparat wyboru 2 z 3.  $F_1, F_2$  - aparaty funkcji podstawowej układu

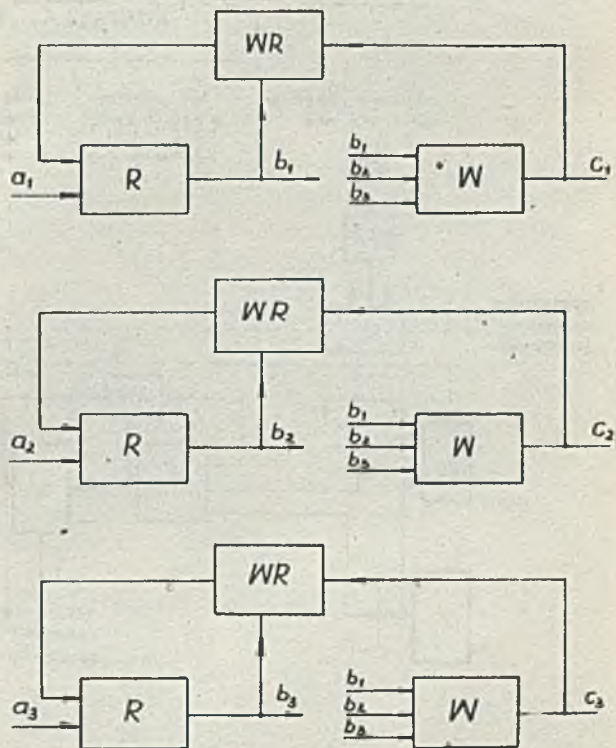
grupą członów wyboru, nie powoduje zakłócenia funkcji podstawowej układu /przykład uszkodzeń zaznaczono na rysunku symbolem X/.

W przypadku, gdy człon wyboru współpracuje z wejściowymi sygnałami pochodzącymi z regulatorów ciągłych o działaniu całkującym /rys. 2/, istnieje możliwość powstania nadmiernej rozbieżności sygnałów wejściowych w wyniku różnic parametrów całkowania. W celu uniknięcia tego zjawiska stosuje się dodatkowy człon współpracy regulatorów z członem wyboru. Zadaniem tych członów jest wytworzenie sygnałów korygujących w celu wzajemnego wyrównania sygnałów wyjściowych regulatorów przez porównanie ich z wartością średnią powstałą na wyjściu członu wyboru.

#### Struktura zabezpieczeń

Struktura zabezpieczeń o dużej niezawodności powinna być stopniowana. Pierwszy stopień obejmuje blokady uzależnione od sprawności technicznej aparatury. Drugi stopień obejmuje blokady uzależnione od wartości określonych parametrów stanu obiektu. Struktura taka nosi cechy równoległego zabezpieczenia i ma ważną zaletę: w pierwszej kolejności oddziałuje na elementy wykonawcze przed osiągnięciem przez regulowany parametr granicznej wartości dopuszczalnej, ograniczając wielkość zakłócenia. Realizacja takiego układu będzie bardzo ułatwiona jeśli na trasach obiekt - część centralna aparatury /zespół dynamicznej obróbki informacji/ zastosuje się niezerowy sygnał przesyłowy 4 - 20 mA, co stwarza możliwość kontroli sprawności linii przesyłowej, przetworników, nadajników położenia organów wykonawczych itp. Kontrola sygnału powinna odbywać się w module separacyjnym 4 - 20 mA/0 - 10 V/ wyposażonym dodatkowo w odpowiedni komparator. Dla niektórych układów regulacji pożądane

jest stosowanie członu, który kontrolując wartość całki uchybu w czasie, będzie po przekroczeniu jej określonej wartości oddziaływać na zespół blokady. Do realizacji blokad pierwszego stopnia wykorzystuje się również wyjściowe sygnały binarne członów wyboru dwu z trzech pojawiające się w przypadku niesprawności wszystkich trzech torów. W strukturze drugiego stopnia zabezpieczeń obowiązuje zasada zwielokrotnienia aparatów kontrolujących wartość kilku wybranych parametrów.



Rys. 2. Trójtorowy układ redundancyjny z regulatorami PI. R - regulator, WR - aparat współpracy układu wyboru z regulatorem, W - aparat wyboru 2 z 3

## Przykład rozwiązania układu

Na rys. 3 przedstawiono układ automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowej o strukturze wynikającej z poprzednich rozważań. Wielkością regulowaną w układzie jest ciśnienie pary, wielkością zakłócającą - przepływ pary, a wielkością nastawiającą jest moc neutronowa reaktora, zmieniana położeniem prętów regulacyjnych. Charakterystyka dynamiczna obiektu wymaga stosowania regulatora o działaniu PI.

Redundancję trójtorową z automatycznym wyborem dwu z trzech zastosowano w układzie pomiarowym wielkości regulowanej oraz w układzie dynamicznej obróbki uchybu regulacji. Układ ten zawiera trzy regulatory PI o wyjściowych sygnałach ciągłych współpracujące z członem wyboru. Trzy moduły współpracy regulatorów z członem wyboru zapewniają minimalną rozbieżność sygnałów wejściowych tego członu.

Układ wykonawczy układu regulacji obejmuje: przetwornik wykonawczy formujący sygnał sterowania stałoprędkościowym siłownikiem elektrycznym oraz siłownik wraz z mechanizmem zmiany położenia prętów regulacyjnych. Pojawienie się sygnału sterowania siłownikiem w kierunku wysuwania prętów uwarunkowane jest stanem wyjściowym logicznego układu blokady.

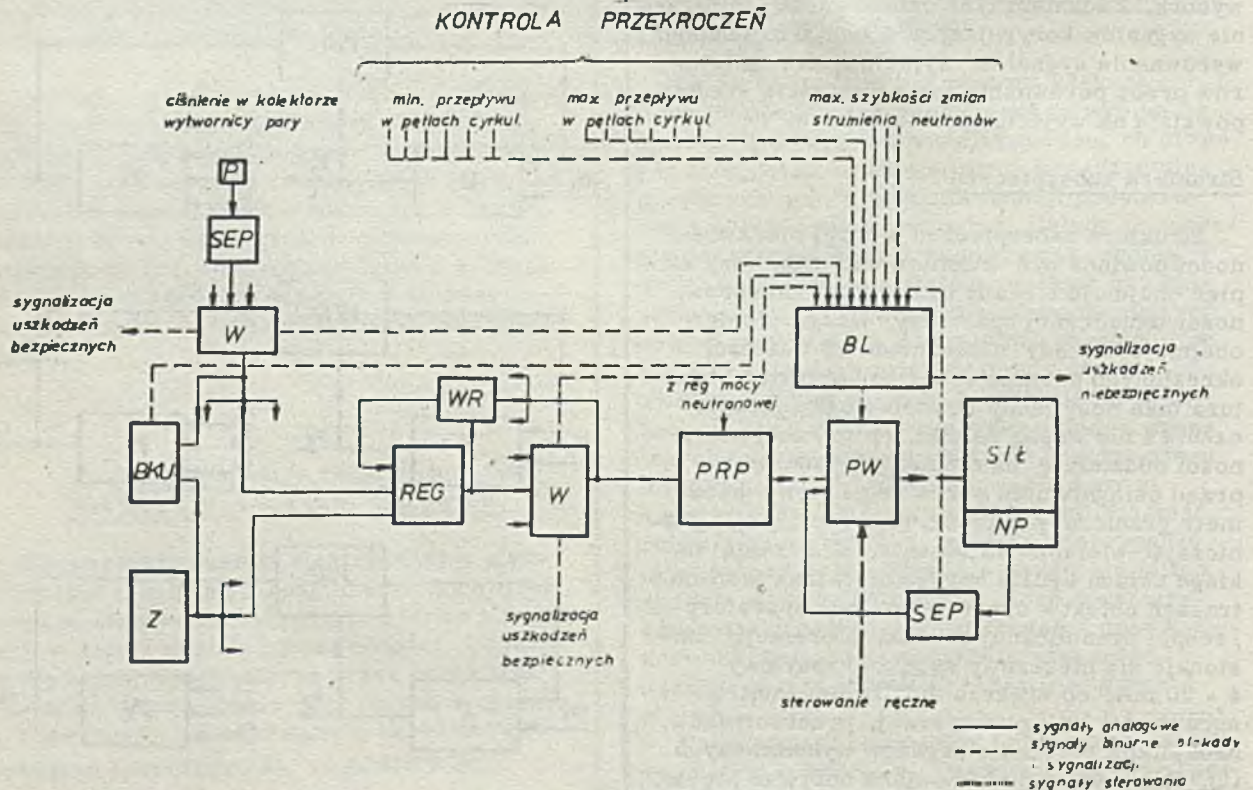
Aktywny stan blokady ma miejsce wówczas, gdy wystąpi jedno z następujących uszkodzeń: uszkodzenie wszystkich sygnałów pomiaru ciśnienia, dwóch regulatorów, obwodu nadajnika położenia serwowotora, uszkodzenie pozostałych bloków układu, w wyniku którego uchyb regulacji nadmiernie wzrośnie. Stan aktywny blokady wystąpi również w przypadku przekroczenia wartości granicznej jednego z następujących parametrów: minimalnego przepływu lub maksymalnej temperatury w dowolnej pętli cyrkulacyjnej lub maksymalnej szybkości zmian strumienia neutronów.

## Opracowanie aparatury specjalnej

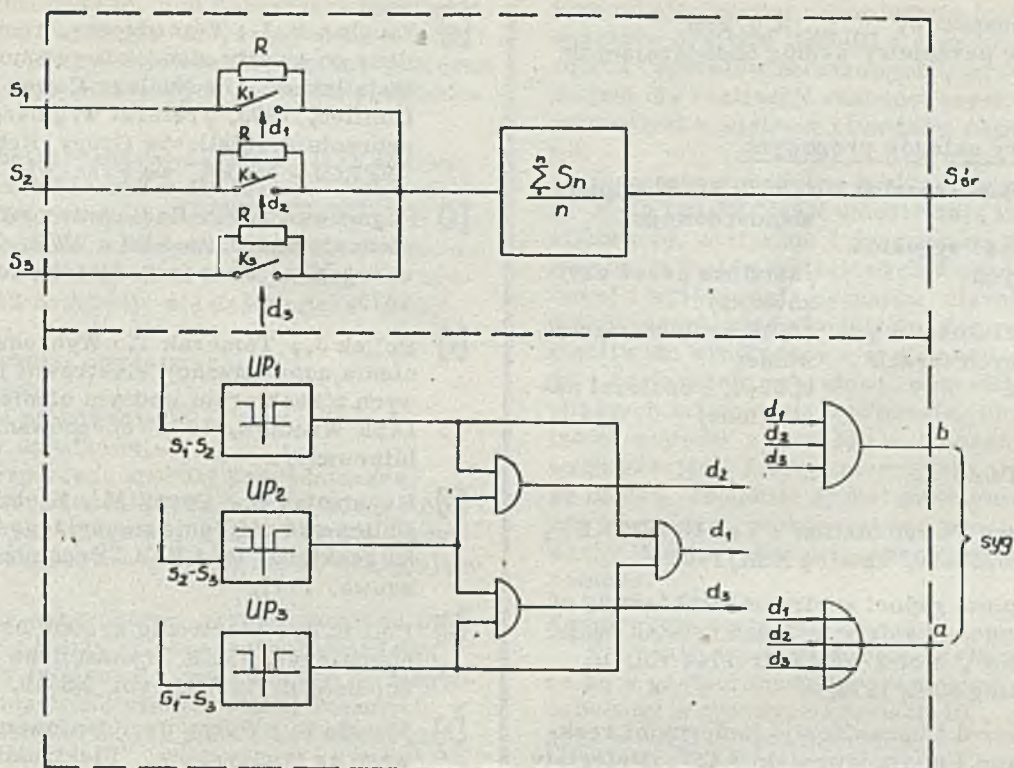
W roku 1974 przystąpiono do opracowania zespołu następujących urządzeń: urządzenie automatycznego wyboru dwu z trzech wartości analogowych, urządzenia śledzenia uchybu regulacji, urządzenia współpracy regulatora z urządzeniem wyboru, urządzenia sygnalizacji i blokady.

Przyjęto następujące ogólne założenia konstrukcyjne:

- Urządzenia będą wykonane w wersji modułowej o dwu rozwiązaniach konstrukcji mechanicznej opartej na typoszeregu modułów TP-3 oraz konstrukcjach zunifikowanych typu ZKM-IASE.
- Analogowe sygnały przesyłowe będą iden-



Rys. 3. Układ automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowej. SEP - separator I U, W - aparat wyboru 2 z 3, WR - człon współpracy aparatu z regulatorem, REG - regulator ciągły o działaniu PI, BKU - człon kontroli uchybu regulacji, Z - zadajnik obciążenia, BL - układ blokady wysuwania prętów, PRP - przetwornik rodzaju pracy "stałe ciśnienie-stała moc neutronowa", PW - przetwornik wykonawczy, SIŁ - siłownik ruchu prętów regulacyjnych, NP - nadajnik położenia ramienia siłownika



Rys. 4. Schemat blokowy aparatu wyboru 2 z 3

UP<sub>1</sub>, UP<sub>2</sub>, UP<sub>3</sub> - urządzenia progowe

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> - klucze

tyczne ze stośowanymi w systemie INTELEK-TRAN.

- Wyjściowe sygnały binarne dla obwodów blokad i sygnalizacji dla postaci napięciowej  
 Poziom L 0 ± 0,5 V obciążalność 20 mA  
 Poziom H 8 ± 12 V obciążalność 5 mA  
 w postaci styków

zwarcie styków - stan aktywny

- Warunki eksploatacyjne będą identyczne z warunkami przyjętymi dla systemu INTELEK-TRAN.

Spośród wymienionych urządzeń zakończono opracowanie urządzenia automatycznego wyboru, którego zasadę działania przedstawia rys. 4.

Kontrola prawidłowości sygnałów wejściowych następuje w sposób ciągły przez wzajemne porównanie ich wartości.

Gdy różnice między sygnałami S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> zawierają się w dopuszczalnym przedziale określonym nastawialną czułością układów progowych UP, sygnał wyjściowy S<sub>dr</sub> jest równy średniej arytmetycznej z wartości trzech sygnałów wejściowych.

Jeśli wartość jednego z sygnałów wejściowych /np. S<sub>1</sub>/ wykazuje różnicę w stosunku do wartości dwóch pozostałych większe od dopuszczalnych, urządzenia progowe UP<sub>1</sub> i UP<sub>3</sub> zmieniają stan, wówczas sygnał wyjściowy d<sub>1</sub> elementu iloczynu logicznego powoduje wyłączenie klucza k<sub>1</sub> wykonanego na tranzystorze

polowym. W przypadku tym sygnał wyjściowy równy jest średniej arytmetycznej dwu sygnałów pozostałych o dopuszczalnej rozbieżności, traktowanych przez układ jako prawidłowe. Równocześnie na wyjściu sygnalizacyjnym "a" pojawia się sygnał uruchamiający sygnalizację powstania uszkodzenia bezpiecznego.

Jeśli nastąpi rzadki w praktyce przypadek nadmiernej rozbieżności wszystkich sygnałów wejściowych, wyłączone zostaną wszystkie klucze k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, ale wartość sygnału wyjściowego d<sub>1</sub> będzie bliska wartości średniej sygnałów wejściowych /rezystancja R jest wielokrotnie większa od rezystancji kanału tranzystora w stanie nasycenia/. Rozwiązanie takie jest znacznie prostsze niż np. układ pamięci stanu przedawaryjnego. Równocześnie na wyjściu sygnalizacyjnym "b" pojawia się sygnał uruchomienia sygnalizacji uszkodzenia niebezpiecznego oraz ewentualnego uruchomienia blokady.

#### Ważniejsze dane techniczne

#### Parametry torów sygnałowych

Sygnały wejściowe - trzy	
sygnały standardowe	0 ± 10 V lub 0 ± 20 mA
Rezystancje wejściowe	50 k ohm lub 500 ohm
Zaciski wejściowe	zwarte
Sygnał wyjściowy - sygnał standardowy	0 ± 10 V oraz 0 ± 20 mA
Rezystancja obciążenia	≥ 2 k ohm oraz 0 ± 500 ohm

Uchyb podstawowy < 0, 25%  
Pozostałe parametry według obowiązujących norm.

#### Parametry układów progowych

Czułość dopuszczalna 1, 5; 2; 4; 6% sygnału standardowego  
Rozbieżność sygnałów wejściowych /ustalona przez użytkownika/  
Różnica czułości w poszczególnych torach ±0, 15 czułości nastawionej  
Histereza 0, 05-0, 2 czułości nastawionej

#### Literatura

- [1] "Surry Power Station": 7 of 10 DOCKET, nr 50280-20, katalog NSA/1969
- [2] "Topical report environmental testing of enginnered safety features related equipment", 1 of 2 WCAP nr 7744 vol. II, katalog NSA/1972.
- [3] "Kontrol i uprawlenie jądernymi reaktorami i oborudowaniem AES", Materiały simpozjuma SEW. t. II, Budapeszt, 1969.

#### **dr inż. JACEK KORYTKOWSKI**

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Warszawa

#### **mgr inż. JAN KURILEC**

#### **mgr inż. KAZIMIERZ SZULC**

Osrodek Badawczo-Rozwojowy Pomiarów i Automatyki Elektronicznej „Mera-Elmat”  
Wrocław

- [4] Vaughan H. J. : Transducers, recommendations on quality standards redundancy and installation. The Nuclear Power Group Limited, 1973, /referat wygłoszony na zebraniu specjalistów Grupy Roboczej "NPPCJ - MAEA" we Francji/.
- [5] Pugaczewa T. F. : Radioaktywnost' i radionnaja zaszcita AES s BWR. Tiejno-energetika, Ekspres - informacja nr 8 1973.
- [6] Pollak J., Tomczak T. : Wybrane zagadnienia automatyzacji elektrowni jądrowych z reaktorem wodnym ciśnieniowym. IASE Wrocław, 1973 /opracowanie niepublikowane/.
- [7] Krystyniak E., Cyran M., Kielczewski T. : Obliczenie ciśnienia awaryjnego w budynku reaktora. BS i PTJ "Proatom", Warszawa, 1971.
- [8] Poll R. A. : Electronic system hardening approaches. IEEE Transactions on Nuclear Science, nr 1/1972, vol NS-19.
- [9] Merski K. : Wpływ promieniowania jądrowego na tranzystory. "Elektronika" nr 12, 1971.

## ELEMENTY AUTOMATYKI SYSTEMU URS-III-M-INTELEKTRAN (WERSJA MODUŁOWA)

W latach 1972-73 do produkcji Wrocławskiego Przedsiębiorstwa Pomiarów i Automatyki Elektronicznej "Mera-Elmat" wprowadzone zostały Elementy Systemu URS-III. System ten, jako efekt prac badawczo-konstrukcyjnych prowadzonych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP" oraz Ośrodku Badawczo-Rozwojowym "Mera-Elmat" wchodzi do krajowego Systemu Automatyki i Pomiarów pod nazwą System INTELEKTRAN.

System URS-III stanowi zbiór aparatów o standardowych parametrach wejściowych i wyjściowych, który umożliwia /wraz z czujnikami i zespołami wykonawczymi produkowanymi przez inne przedsiębiorstwa Zjednoczenia "Mera"/ zestawienie różnorodnych układów automatycznej kontroli, regulacji i sterowania podstawowych procesów technologicznych w przemyśle, mających charakter ciągły, wolnozmienny.

Szczegółowe opisy, dane techniczne, przykłady zastosowań oraz inne informacje niezbędne przy projektowaniu konkretnych układów automatycznej regulacji podane zostały w kartach informacyjnych poszczególnych aparatów, zamieszczonych między innymi w Biuletynie Informacyjnym URS nr VI/73 oraz w kartach katalogowych rozsyłanych na żądanie przez dział Zbytu i Eksportu Przedsiębiorstwa "Mera-Elmat".

Aparaty systemu URS przeznaczone są /w wykonaniach typowych/ do pracy w pomieszczeniach produkcyjnych w warunkach klimatu umiarkowanego. Na podstawie specjalnych uzgodnień z zamawiającym wykonywane są również wersje przeznaczone do pracy w warunkach klimatu tropikalnego suchego /TA/.

System URS może być również instalowany na obiektach przemysłu chemicznego, petrochemicznego itp., gdzie panują warunki zagro-

zenia wybuchowego, pod warunkiem spełnienia specjalnych wymagań dotyczących instalacji obwodów elektrycznych iskrobezpiecznych oraz zastosowania dodatkowych aparatów pośredniczących.

Iskrobezpieczeństwo systemu URS zostało szczegółowo opisane w Biuletynie URS nr VII/73, zawierającym również karty Informacyjne wspomnianych wyżej aparatów pośredniczących. Pod względem funkcjonalnym w systemie URS rozróżnia się następujące grupy aparatów:

- przetworniki pomiarowe,
- regulatory,
- stacyjki sterowania,
- aparaty dodatkowe,
- iskrobezpieczne aparaty pośredniczące.

Z punktu widzenia lokalizacji i budowy poszczególnych aparatów, system URS w wersji obecnie produkowanej dzieli się na następujące grupy:

- a. aparaty skrzynkowe, przeznaczone do instalowania w pobliżu obiektu technologicznego;
- b. aparaty tablicowe, przeznaczone do montażu w tablicach lub szafach zlokalizowanych w nastawniach lub innych pomieszczeniach zamkniętych;
- c. aparaty pulpitemowe, instalowane w pulpitemach lub tablicach zlokalizowanych w nastawniach lub innych pomieszczeniach przystosowanych do stałego przebywania w nich personelu obsługującego.

Ostatnie prace badawczo-konstrukcyjne Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie /Ośrodek Automatyki Elektrycznej/ oraz konstrukcyjno-technologiczne Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Pomiarów i Automatyki Elektronicznej we Wrocławiu umożliwiły wprowadzenie do programu produkcyjnego WPIAE "Mera-Elmat" w latach 1974-75 - WERSJI MODUŁOWEJ ELEMENTÓW AUTOMATYKI SYSTEMU URS-III /M/, stanowiącej kontynuację prowadzonych w "Mera-PIAP" prac wynikających z tematu "Wersja moduła systemu INTELEKTRAN Krajowego Systemu Automatyki i Pomiarów POLMATIK".

Szczegółowe informacje o modułach URS-III-M-INTELEKTRAN zawarte zostały w zbiorze kart katalogowych "INTELEKTRAN - Urządzenia Elektrycznej Automatyki Analogowej", wydanym przez "Mera-PIAP", kolportowanym przez "Mera-PIAP" i "Mera-Elmat" oraz w opracowaniu p. t. "KSAIP POLMATIK" - Informator zastosowań części centralnej POLMATIK-INTELEKTRAN - urządzenia przetwarzające elektryczne analogowe do automatyzacji procesów wolnozmiennych", wydanym przez "Mera-PIAP".

### URS-III-M - INTELEKTRAN

#### Informacje ogólne

#### Przeznaczenie

Wersja moduła elementów automatyki systemu URS-III-M-INTELEKTRAN, obejmu-

jąca między innymi odpowiedniki funkcjonalne aparatów systemu URS-III z grup "regulatorów" i "aparatu dodatkowych", przewidziana jest dla realizacji rozbudowanych układów automatyki z wieloma obwodami regulacyjnymi.

Elementy wchodzące w skład zestawu URS-III-M-INTELEKTRAN umożliwiają liniowe i nieliniowe, statyczne i dynamiczne przetwarzanie sygnałów wejściowych z części pomiarowej i wytwarzanie sygnałów sterujących o pożądanych właściwościach. Zapewniają możliwość współpracy z systemami cyfrowymi i dostarczają aparatowi wszystkich niezbędnych informacji o procesie, umożliwiając na wypadek awarii lub w stanach rozruchowych przejęcie funkcji sterowania przez obsługę ludzką. Jednolity sygnał przesyłowy umożliwia tworzenie, ze stosunkowo niewielkiej liczby bloków, skomplikowanych struktur sterowania.

#### Konstrukcja mechaniczna

Elementy automatyki URS-III-M wykonywane są w postaci modułów przystosowanych do zabudowy w typowych kasetach 19", montowanych w szafach lub tablicach.

Konstrukcja mechaniczna URS-III-M oparta została na obudowach typowych TP-3 produkcji Wielkopolskich Zakładów Automatyzacji Kompleksowej "Mera-ZAP-Mont" w Ostrowie Wielkopolskim.

#### Sygnały przesyłowe

Sygnałem wewnętrznym zestawu URS-III-M-INTELEKTRAN, służącym do komunikacji między modułami w obrębie części centralnej układów automatycznej regulacji, jest sygnał napięciowy 0.....10 V prądu stałego.

Jako podstawowy sygnał przesyłowy zewnętrzny, służący do komunikacji między modułami URS-III-M-INTELEKTRAN a przetwornikami pomiarowymi oraz elementami wykonawczymi, przyjęty został sygnał prądowy 4....20 mA. W charakterze zewnętrznego sygnału przesyłowego mogą być również stosowane sygnały 0....5, 0....20, 2....10, 0....50 mA prądu stałego, charakterystyczne dla różnorodnych urządzeń automatyki produkowanych w kraju lub pochodzących z importu, z którymi zestaw URS-III-M-INTELEKTRAN może współpracować.

#### Struktura zestawu

Zestaw URS-III-M-INTELEKTRAN obejmuje następujące grupy funkcjonalne modułów:

- przetworniki sygnałowe,
- regulatory,
- stacyjki,
- przeliczniki analogowe,
- moduły i aparaty dodatkowe.

#### Moduły systemu INTELEKTRAN

Przetworniki sygnałowe przetwarzają sygnały przesyłowe z przetworników pomiarowych na standardowy sygnał 0....10 V części central-

nej systemu. Przetworniki sygnałów wejściowych ASW-21M oraz separatory ASS-21M przetwarzają różne prądowe i napięciowe sygnały standardowe i filtrują zakłócenia. Separatory zapewniają ponadto galwaniczne oddzielenie obwodów wejścia i wyjścia.

Regulatory służą do dynamicznego przetwarzania sygnałów wejściowych i wytwarzania wyjściowego sygnału regulacyjnego. Niżej zestawiono funkcje realizowane przez regulatory systemu:

<u>Regulatory ciągłe</u>	Działanie
Moduł ARC-21M	proporcjonalno-całkujące
Moduł ARC-21M+ARC-23M	proporcjonalne, całkujące i różniczkujące
Moduł ARC-22M	proporcjonalne
Moduł ARC-23M	różniczkujące
Moduł ARC-31M	realizacja układów kaskadowych

<u>Regulatory krokowe</u>	Działanie
Moduł ARK-21M	proporcjonalno-całkujące
Moduły ARK-21M+ARC-23M	proporcjonalne, całkujące i różniczkujące

Stacyjki zapewniają prowadzenie procesu z pulpitu operatora oraz zabezpieczają współpracę systemu z układami komputerowymi. Stacyjki stosują nowoczesny system "zielonej linii" wskazywania parametrów procesu regulowanego. Stacyjka ANC-21 przeznaczona jest do współpracy z regulatorami ciągłymi. Stacyjka ANK-21 przeznaczona jest do współpracy z regulatorami krokowymi. Zadajnik ANP-21M służy do wytwarzania nastawnego sygnału polaryzacji.

Przeliczniki analogowe służą do realizacji różnych operacji matematycznych na sygnałach analogowych. Niżej zestawiono różne operacje realizowane przez przeliczniki analogowe:

Urządzenie	Operacja
Moduł ABS-21M	sumowanie 4 sygnałów
Moduł ABI-21M	inwersja sygnału
Moduł AMC-21M	całkowanie ze wskazaniem cyfrowym
Moduł ABU-21M	mnożenie i dzielenie 3 sygnałów
Moduł ABM-21M	mnożenie
Moduł ABD-21M	dzielenie
Moduł ABP-21M	pierwiastkowanie

Moduły i aparaty dodatkowe służą do realizacji funkcji logicznych lub operacji nieliniowych na sygnałach analogowych. Niżej zestawiono funkcje i operacje realizowane przez te urządzenia:

Urządzenie	Funkcja
Moduł ADE-21M	wybór wartości ekstremalnej
Moduł ADL-21M	ograniczenie wartości dolnej i górnej
Moduł ADR-21M	nieliniowe rozdzielanie sygnału

Moduł ADA-21M sygnalizacja przekroczenia poziomów

Moduł AZS-21M zasilanie grupy modułów.

Ważniejsze dane techniczne

Temperatura pracy

- aparatów pulpitowych i tablicowych 0°.....50°C
- urządzeń w wykonaniu modułowym +5°.....+60°C

Zasilanie urządzeń w wykonaniu modułowym i

stacyjek 2x24 V

Dokładność

- porównania regulatorów 0,25%
- przetworników sygnałowych od 0,16% do 0,6%
- urządzeń matematycznych od 0,25% do 1%

Parametry dynamiczne regulatorów

- zakres proporcjonalności 3%...500%
- czas całkowania 0,1 min.....30 min
- czas różniczkowania 1 s.....1000 s

#### Współpraca urządzeń INTELEKTRANU z innymi systemami

Urządzenia INTELEKTRANU mogą współpracować z:

- urządzeniami wykonawczymi elektrycznymi jak: sterowniki mocy, przetworniki sprzężenia zwrotnego od położenia, siłowniki z napędem silnikowym lub elektromagnetycznym, kompletne człony wykonawcze z napędem silnikowym lub elektromagnetycznym;
- urządzeniami pneumatycznymi poprzez przetworniki elektropneumatyczne i pneumoelektryczne;
- urządzeniami hydraulicznymi poprzez przetworniki elektrohydrauliczne;
- urządzeniami pomiarowymi poprzez dowolne przetworniki pomiarowe o sygnałach przesyłowych zawierających się w szeregu sygnałów wejściowych przewidzianych dla przetworników sygnałowych /0...5, 0...20, 4...20, 2...20, 0...50mA, 0...10 V/;
- komputerowymi systemami sterowania poprzez stacyjki operacyjne i urządzenia sprzęgające.

#### Współpraca z systemami komputerowymi

Urządzenia sprzęgające spełniają rolę bufora i przetwornika dla sygnałów przenoszących informację między komputerem a pozostałymi urządzeniami.

Stacyjki operacyjne ANC-21, ANK-21 umożliwiają realizację następujących prostych obwodów regulacji:

- sterowanie nadrzędne /Supervisory Control/ z użyciem regulatora krokowego,
- sterowanie nadrzędne z użyciem regulatora ciągłego,
- bezpośrednie sterowanie cyfrowe /Direct Digital Control/ z rezerwowym, na wypadek awarii komputera, regulatorem ciągłym,
- bezpośrednie sterowanie cyfrowe bez regulatora rezerwowego.



W ramach systemu możliwe jest również tworzenie złożonych obwodów regulacji nadzorowanych przez komputer, takich jak np. układ regulacji kaskadowej, układy regulacji stosunku.

W przypadku awarii komputera, z urządzeń sprzęgających do stacyjek przekazywany jest sygnał awarii, który powoduje samoczynne przejście na regulację lokalną /analogową/.

### Zakończenie

Elementy automatyki systemu URS-III-INTELEKTRAN są eksploatowane w wielu ważnych obiektach przemysłowych /m. in. w prawie wszystkich blokach energetycznych 200 MW, instalowanych w energetyce po roku 1968/.

Wersja modułowa URS-III-M-INTELEKTRAN w "pilotowych" zastosowaniach Instytutu Techniki Ciepłej, Instytutu Energetyki, Zakładów Farmaceutycznych "Polfarm" i wielu innych wykazała swą przydatność do zastosowań przemysłowych.

Łatwość modyfikacji, uzupełnień i rozszerzania asortymentu funkcji w wersji modułowej wykazują wyższość tego sposobu konstru-

owania elementów automatyki dla potrzeb wielkich obiektów technologicznych wymagających skomplikowanych struktur układów automatycznej regulacji, sterowania i kontroli, nagromadzenia dużych ilości sprzętu i umożliwiających właściwe zorganizowanie oraz wyposażenie Służb Automatyki i Pomiarów.

Zebrane w latach 1960-75 doświadczenia konstrukcyjno-technologiczne i tradycje produkcyjne, związane z technicznym przygotowaniem produkcji oraz doświadczenia z eksploatacji kolejnych wersji elementów automatyki URS, a w ostatnich latach również POLMATIK, stwarzają możliwości zaspokojenia potrzeb użytkowników sprzętu automatyzacji w oparciu o krajowe opracowania, również w przypadku zgłoszenia zmienionych wymagań techniczno-eksploatacyjnych.

Szczegółowe informacje o podjętych pracach badawczo-rozwojowych i zamierzeniach wdrożeniowych, rozszerzających zastosowania systemu URS-III-M-INTELEKTRAN dla nowych obiektów technologicznych energetyki krajowej, zostały rozesłane do zainteresowanych tym zagadnieniem instytucji.

**doc. dr hab. STEFAN CHWASZCZEWSKI**

Instytut Badań Jądrowych  
Zakład Fizyki Reaktorowej  
Świerk

## INCORMER – KOMPUTEROWY SYSTEM POMIARÓW WEWNĄTRZRDZENIOWYCH

### REAKTORÓW WWER-440 I WWER-1000

#### 1. Wstęp

W większości przypadków reaktory atomowe przeszły już stadium badań naukowych i weszły do eksploatacji jako źródła energii: ciepłej w przypadku reaktorów energetycznych i energii promieniowania w przypadku reaktorów badawczych. Zarówno konstrukcja reaktorów, jak i sposób ich eksploatacji muszą być dobrane tak, aby uzyskać produkowaną przez reaktor energię możliwie najtaniej i możliwie najlepszej jakości.

Oczywiście, tym samym prawom podlegają energetyczne reaktory wodno-ciśnieniowe. Wyprodukowanie największej ilości energii o możliwie najwyższych parametrach z jednostkowej ilości paliwa i w jednostce objętości reaktora przy niedopuszczeniu do zmniejszenia niezawodności reaktora i do pogorszenia warunków bezpieczeństwa - to ogólnie podstawowe czynniki określające obecnie ekonomikę tych urzą-

dzeń. W niedalekiej przyszłości dojdzie jeszcze jeden aspekt ekonomiki tych reaktorów: możliwość pracy przy zmiennych obciążeniach.

Wodno-ciśnieniowe reaktory energetyczne /w nomenklaturze radzieckiej WWER-wodowodjanyje energetičeskije reaktory/ mają być w początkowym okresie podstawowym typem reaktorów energetycznych, wprowadzanych do energetyki atomowej Polski. Jednym ze sposobów polepszenia parametrów ekonomicznych eksploatacji tego typu reaktorów jest wykorzystanie odpowiednio przetworzonej informacji o procesach fizycznych i cieplno-przepływowych zachodzących w rdzeniu.

Zarówno ilość mierzonych wielkości wewnątrz rdzenia reaktora, jak i zakres obliczeń niezbędnych do przetworzenia tej informacji w dane przydatne do podejmowania decyzji

eksploatacyjnych, wymagają zastosowania maszyny matematycznej i układów pomiarów cyfrowych współpracujących w reżimie "on line" z maszyną cyfrową. Całość aparatury pomiarowej, maszyna cyfrowa, urządzenia peryferyjne oraz odpowiednie oprogramowanie - tworzą system pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktora energetycznego.

W Instytucie Badań Jądrowych i Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP" rozpoczęto opracowanie takiego systemu dla reaktorów WWER-440 i WWER-1000, nazwanego systemem INCORMER. W niniejszej pracy na tle wykorzystywania informacji przekazywanych przez system pomiarów wewnątrzrdzeniowych przedstawiono koncepcję i niektóre rozwiązania opracowywanego systemu. Oprogramowanie specjalne systemu INCORMER przedstawiono w [1].

## 2. Rola pomiarów wewnątrzrdzeniowych przy eksploatacji reaktorów energetycznych typu WWER

Produkcji energii cieplnej w reaktorze atomowym towarzyszy szereg procesów, które; w zasadniczy sposób wpływają na właściwości reaktora. Wzrost temperatury chłodziwa i paliwa powoduje pogorszenie warunków przebiegu łańcuchowej reakcji rozszczepienia. Ulegają "spaleniu" jądra izotopów paliwowych, a na to miejsce zjawiają się produkty rozszczepienia, które również ujemnie wpływają na przebieg reakcji łańcuchowej.

Tak więc, reaktor atomowy przeznaczony do produkcji dużych ilości energii cieplnej przez dostatecznie długi okres czasu, musi posiadać znaczną nadwyżkę paliwa jądrowego. W reaktorze WWER-440 obliczonym na okres pracy między przeładunkami paliwa /około 800 godzin/ znajduje się 46 ton paliwa, podczas gdy krytyczność osiąga się przy 700 kg tego samego paliwa. Oczywiście, ten nadmiar paliwa musi być skompensowany wprowadzeniem do rdzenia reaktora odpowiednich elementów pochłaniających neutrony.

Z powyższego wynika, że energetyczny reaktor typu WWER jest układem, w którym lokalne zmniejszenie zdolności kompensacji może doprowadzić do znacznego zwiększenia generacji energii w ograniczonej objętości. I łatwo pokazać, że istnieją sytuacje, w których to lokalne zwiększenie gęstości generowanej mocy nie będzie zarejestrowane przez czujniki umieszczone na zewnątrz reaktora: zewnątrzrdzeniowe mierniki strumienia neutronów oraz mierniki temperatur na głównych pętlach chłodzenia reaktora.

Globalna moc reaktora jest ograniczona granicznymi warunkami technologicznymi bezawaryjnej pracy elementów rdzenia [2].

Należy tu bardzo silnie podkreślić warunki bezawaryjnej pracy elementów paliwowych, których uszkodzenie powoduje nie tylko duże zagrożenie radiologiczne, ale powoduje wyłączenie reaktora na dłuższy czas. Należy pamiętać, że uszkodzeniu ulegają elementy paliwowe pracujące w obszarze reaktora z największą gęstością generowanej mocy.

A więc jedną z dróg do zwiększenia globalnej mocy reaktora jest uzyskanie możliwie równomiernego rozkładu generowanej mocy w rdzeniu w przeciągu całej kampanii paliwowej. W tym celu określa się odpowiednią konfigurację rozkładu w rdzeniu paliwa jądrowego o odpowiednim wzbogaceniu lub wypaleniu. Konfiguracja taka dla zadanego sposobu eksploatacji reaktora zostaje ustalona przy pomocy odpowiednich obliczeń fizycznych i ciepłno-przepływowych rdzenia. Następnym etapem jest odpowiednia eksploatacja rdzenia, w której przez odpowiednie zagłębienie elementów regulacyjnych uzyskuje się równomierny rozkład generacji mocy. Dla utrzymania wyrównanego rozkładu generacji mocy należy ten rozkład znać. Oczywiście, z pewnym przybliżeniem można go wyznaczyć znając konstrukcję rdzenia, przebieg dotychczasowej eksploatacji rdzenia i aktualny rozkład zagłębień regulatorów. Wynik takich obliczeń /uzyskanych z dużym nakładem czasu maszyny cyfrowej/ jest jednak obarczony bardzo dużym błędem - do 30% [3]. I tu pojawia się konieczność zastosowania systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych.

System pomiarów wewnątrzrdzeniowych jest zespołem czujników, linii pomiarowych, urządzeń przetwarzających połączonych "on-line" z odpowiednio oprogramowanym układem maszyn cyfrowych. System ten, na podstawie odpowiedniej obróbki matematycznej wyników pomiarów oraz wykorzystując informacje o geometrii i składzie materiałów rdzenia, powinien podawać informacje o:

- rozkładach przestrzennych generowanej w reaktorze mocy;
- rozkładach przestrzennych zużycia paliwa;
- odległościach od krytycznych gęstości wydzielanej mocy, przy których może nastąpić uszkodzenie rdzenia;
- dopuszczalnych zmianach mocy reaktora w przypadku elektrowni podszczytowej;
- przekroczeniach dopuszczalnych parametrów eksploatacyjnych.

Powyżej przedstawiono tylko informacyjną rolę systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych. Rolę taką będzie spełniał system w pierwszym okresie rozwoju. Dalsze prace związane z oprogramowaniem będą prowadzone pod kątem powierzenia systemowi funkcji weryfikatora decyzji operatora reaktora, następnie funkcji doradczych. Dalszy rozwój będzie

dotyczył funkcji sterowania przestrzennym rozkładem mocy generowanej w reaktorze.

Zastosowanie maszyn cyfrowych z odpowiednimi urządzeniami peryferyjnymi pozwoli przedstawić opracowaną informację w najbardziej dla operatora dogodnej formie. System będzie również opracowywał raporty eksploatacyjne reaktora. Bardzo ważnym wynikiem zastosowania systemu pomiarów wewnętrzzdzeniowych jest możliwość uzyskania tzw. raportu awaryjnego reaktora obrazującego przebieg eksploatacji urządzenia w pewnym okresie przed wystąpieniem sytuacji awaryjnej<sup>x/</sup>.

A więc system pomiarów wewnętrzzdzeniowych przeznaczony jest do uzyskania i przedstawiania zasadniczo nowej jakościowo informacji; informacji, która nie może być uzyskana z innych źródeł. Informacja taka jest niezbędnym warunkiem intensyfikacji parametrów pracy reaktora WWER-440 oraz zastosowania bloku do reżimu nadążnego za obciążeniem sieci.

### 3. Oprzyrządowanie rdzeni reaktorów wodno-ciśnieniowych w urządzenia pomiarów wewnętrzzdzeniowych

Zasadniczą trudnością przy realizacji systemu pomiarów wewnętrzzdzeniowych jest odpowiednie oprzyrządowanie rdzenia reaktora urządzeniami, pozwalającymi uzyskać informację o parametrach pracy rdzenia. Temperatura rzędu 300°C, ciśnienie 100-160 bar, ogromne strumienie promieniowania reaktorowego oraz wymagania dotyczące dokładności pomiarów czynią zadanie bardzo trudnym. Dodatkowo, informacja z tych urządzeń musi być wyprowadzona na zewnątrz korpusu reaktora. W tym celu w zbiorniku ciśnieniowym reaktora należy wykonać odpowiednią liczbę przepustów, co zawsze spotyka się ze zdecydowanym oporem konstruktorów zbiornika reaktora, odpowiedzialnych za bezpieczeństwo pracy zbiornika.

Dlatego też rodzaj i ilość urządzeń zainstalowanych w rdzeniu reaktora dobiera się po dokładnych badaniach właściwości urządzeń, dokładności otrzymywanej z tych urządzeń informacji oraz od rozsądnego kompromisu między potrzebami uzyskania informacji a warunkami niezawodności i technicznej możliwości instalacji.

Po przeprowadzeniu wielu analiz i doświadczeń eksploatacyjnych, w przypadku reaktorów

<sup>x/</sup> W tym przypadku jako awarię traktuje się każdą sytuację doprowadzającą do wyłączenia reaktora przez układ zabezpieczeń.

wodno-ciśnieniowych ograniczono się do pomiarów dwóch wielkości w rdzeniu reaktora:

- 1/ Strumieni neutronów,
- 2/ Temperatur chłodziwa.

Wielkość strumienia neutronów określa pośrednio gęstość mocy w danym punkcie reaktora. Temperatura wchodzi bezpośrednio do bilansu cieplnego określonej części rdzenia.

#### 3.1. Czujniki strumieni neutronów

##### 3.1.1. Wymagania stawiane czujnikom strumieni neutronów

Specyfika pracy tych urządzeń w rdzeniu reaktora i w systemie zawierającym dużą liczbę tych urządzeń pozwala sformułować pewne ogólne wymagania:

- 1/ Odpowiednia technologia wykonania pozwalająca produkować czujniki bez ich atestacji z rozrzutem wydajności nie większym niż 0,5%;
- 2/ Czujniki muszą wytrzymać warunki pracy w rdzeniu reaktora przez co najmniej 8000 godzin. Ewentualne zmiany wydajności muszą być jednoznacznie określone dla wszystkich czujników i znane z dokładnością nie gorszą niż 0,5%;
- 3/ Czujniki powinny mieć minimalną czułość na promieniowanie gamma.

Żądania te wynikają z niemożliwości przeprowadzenia atestacji wydajności detektorów przed załadowaniem do rdzenia oraz w czasie pracy reaktora. Żądania dokładności są bardzo wysokie, aby stosowanie systemu pomiarów wewnętrzzdzeniowych miała sens, strumienie neutronów muszą być określone z dokładnością nie gorszą niż 1%.

Poniżej rozpatrzmy poszczególne rodzaje czujników stosowane w systemach pomiarów wewnętrzzdzeniowych.

##### 3.1.2. Miniaturowe rozszczepieniowe komory jonizacyjne

Zasada działania rozszczepieniowej komory jonizacyjnej jest ogólnie znana. Miarą strumienia neutronów jest ilość impulsów prądu lub wielkość prądu płynącego w gazie jonizowanym fragmentami rozszczepień pierwiastków rozszczepialnych umieszczonych w komorze, pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

Komory jonizacyjne są rzadko stosowane do pomiarów wewnętrzzdzeniowych. Opracowane są komory jonizacyjne, które w podwójnym ekranie mają średnicę 5 mm. Komory takie zostały również opracowane w Instytucie Badań Jądrowych i są wytwarzane w Zakładzie Doświadczalnym Aparatury Unikalnej BJ.

Ograniczenia stosowania tych urządzeń wynikają z trudnej technologii ich wytwarzania i stosowania. Gaz wypełniający komorę jonizacyjną zmienia swój skład pod wpływem promieniowania i wysokiej temperatury. Część gazu zostaje zokludowana na ściankach komory, część gazu uwalnia się z metalu komory. Przebieg tego procesu bardzo trudno jest określić ilościowo. Komory te są czułe na promieniowanie gamma. Dodatkowe trudności wynikają z rozrzutów wydajności komór i z trudności doprowadzenia do komory napięcia polaryzacji.

### 3.1.3. Pomiary aktywacyjne

Zasada tego typu pomiarów polega na okresowym wprowadzeniu do reaktora detektorów aktywacyjnych /określonych kształtek materiału ulegającego aktywacji pod działaniem neutronów/, a następnie pomiarowi aktywności tych detektorów urządzeniami pozareaktorowymi. Początkowo były to druty wprowadzane do pionowych kanałów w rdzeniu reaktora półautomatycznie. System ten został znacznie ulepszony w urządzeniach tzw. aeroball, w których detektor aktywacyjny w postaci kulek umieszczany jest w reaktorze, a następnie w urządzeniu pomiarowym przy pomocy poczty pneumatycznej.

System ten ma swoje zalety. Dokładność pomiaru, niezależność wydajności od czasu pracy reaktora, niewrażliwość na promieniowanie gamma, to niewątpliwe walory tej metody. Strony negatywne to: znaczny okres czasu od wykonania pomiaru do czasu uzyskania informacji oraz bardzo rozbudowany system sterowania przenoszeniem detektorów.

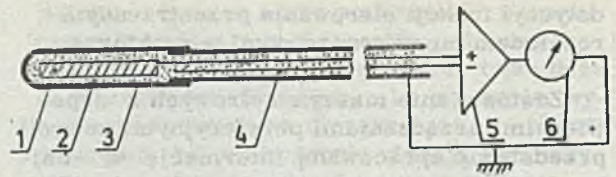
System aeroball wraz z innymi detektorami neutronów został zastosowany w pomiarach wewnątrzrdzeniowych reaktora energetycznego elektrowni Stade [4].

### 3.1.4. Beta emisyjne detektory neutronów

Detektory te są znane również jako kolektory lub samozasilające się detektory neutronów. Miarą wielkości strumienia neutronów jest wielkość prądu cząstek beta, emitowanych w wyniku reakcji jądrowych wywołanych neutronami. Detektory te nie potrzebują zewnętrznego źródła napięcia.

Schemat takiego detektora przedstawiono na rys. 1. Materiał emitera dobiera się tak, aby w wyniku zachodzących w nim reakcji jądrowych powstawały cząstki beta. Cząstki te przenikają przez cienką warstwę izolacji, generując tym samym prąd, którego wielkość jest proporcjonalna do częstotliwości występowania reakcji jądrowych.

Obecnie ten typ detektora jest uważany za najbardziej przydatny do systemu pomiarów



Rys. 1. Schemat beta emisyjnego detektora neutronów 1-emitery, 2-izolacja ceramiczna, 3-kolektor ze stali nierdzewnej, 4-ceramiczny kabel 2-żyłowy w stalowym okłame, 5-wzmacniacz prądu, 6-miernik

wewnątrzrdzeniowych. Przy produkcji detektora można osiągnąć dużą powtarzalność parametrów, zmiana wydajności detektora w miarę eksploatacji może być określona dość dokładnie. Detektor ten ma również cechy negatywne, jak np.: pewną bezwładność odpowiedzi detektora na zmiany strumienia neutronów, niewielką czułość na promieniowanie gamma oraz pewną składową prądu generowaną pod wpływem promieniowania gamma na kablu doprowadzającym sygnał. Ten ostatni efekt można wyeliminować umieszczając w kablu drugą żyłę i odpowiednio korygując wynik pomiaru przy pomocy wyniku pomiaru prądu z dodatkowej żyły "tła".

### 3.2. Pomiary temperatur wewnątrz rdzenia reaktora

Urządzeniami stosowanymi do określenia temperatury chłodziwa wewnątrz korpusu reaktora mogą być czujniki termooporowe lub termopary. Ze względu na znaczny wpływ promieniowania reaktorowego na charakterystyki czujnika termooporowego stosuje się prawie wyłącznie termopary chromel-alumel jako najbardziej odporne na promieniowanie reaktorowe [4, 5].

Termopary umieszcza się zazwyczaj na wylocie chłodziwa z kaset paliwowych rdzenia reaktora, w pewnej odległości od rdzenia. Przy zadanej temperaturze chłodziwa na wlocie do rdzenia i zadanych przepływach chłodziwa wielkość temperatury chłodziwa na wylocie z kasy zawiera informację o mocy generowanej w kasecie. Dlatego nawet reaktory nie posiadające systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych mają rozbudowany system czujników temperaturowych w rdzeniu.

W reaktorze wodno-ciśnieniowym chłodziwo przy przejściu przez rdzeń podgrzewa się średnio o 30°C na poziomie około 300°C. Dlatego też jest wymagana duża dokładność określenia temperatur na wylocie chłodziwa z kaset. Oczywiście, dokładność określenia przyrostu temperatury chłodziwa w rdzeniu można byłoby zwiększyć instalując różnicowe temperatury. Jednakże nie jest znane zachowanie się kabla termopary przy dużych dawkach promieniowania reaktorowego, a dla realizacji termopary różnicowej należy przepuścić kabel przez rdzeń.

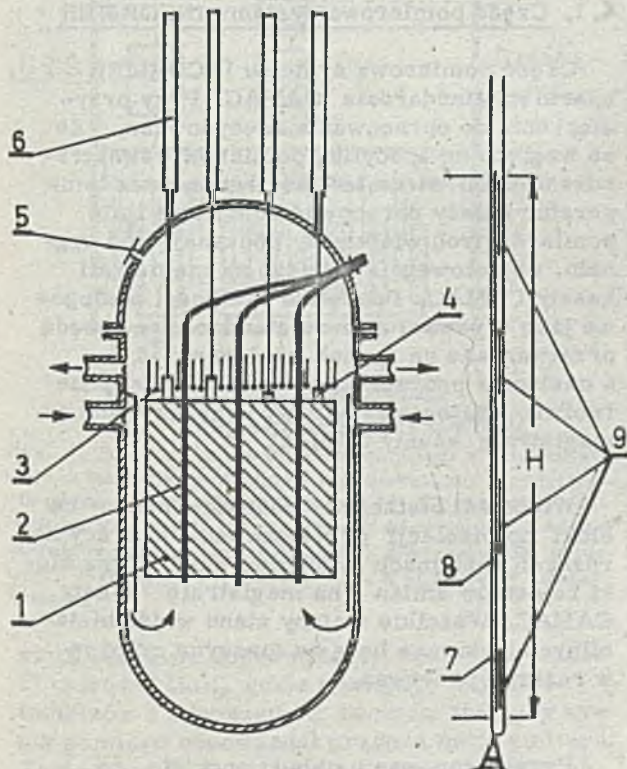
Temperatura chłodziwa na wlocie do rdzenia reaktora wyznaczana jest na podstawie pomiarów temperatury wody wprowadzanej do zbiornika reaktora z obiegów chłodzenia.

### 3.3. Pomiar pozostałych parametrów technologicznych reaktora

Pozostałe parametry reaktora, niezbędne do analizy jego pracy, jak: położenie regulatorów, ciśnienie chłodziwa, spadki ciśnienia chłodziwa na rdzeniu reaktora, koncentracja kwasu bornego w chłodziwie i inne są standardowymi pomiarami technologicznymi i nie będą omawiane ogólnie w tej części pracy. Nie będą także omawiane rozwiązania układów przetwarzania i połączeń z maszyną cyfrową w reżimie "on line". Zagadnienia te są wspólne dla zastosowań maszyn cyfrowych w układach centralnej rejestracji i przetwarzania danych i są przedstawione jako rozwiązania konkretnego systemu opracowanego w IBJ i "Mera-PIAP".

### 4. System pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktorów WWER-440 i WWER-1000 INCORMER

System ten powstaje przy współpracy i pomocy naukowców z ZSRR, według wymagań i założeń technicznych uzyskanych ze Związku



Rys. 2. Rozmieszczenie detektorów strumieni neutronów i termopar w zbiorniku reaktora. 1-rdzeń, 2-zestaw detektorów neutronów: jeden zestaw pokazano w powiększeniu /A/, 3-termopary, 4-elementy regulacyjne reaktora, 5-wyprowadzenie kabli termopar ze zbiornika, 6-napędy prętów regulacyjnych, 7-rurka stalowa z zestawem detektorów, 8-detektor wanadowy, 9-detektor rodowy, H-wysokość rdzenia reaktora

Radzieckiego. Opracowując system opieramy się na uzgodnieniach, że rdzeń reaktora zostanie oprzyrządowany w urządzeniach oraz system czujników strumieni neutronów i temperatur przez dostawcę reaktora. Przewidziano zainstalowanie w reaktorze i urządzeniach z nim związanych następujących czujników i punktów pomiarów parametrów, niezbędnych do analizy przez system INCORMER:

#### 1/ Strumień neutronów

- reaktor WWER-440: 32 zestawy pomiarowe, w każdym zestawie 5 beta emisyjnych detektorów neutronów, 4 z nich z rodowym emitorem o długości czynnej ok. 20 cm; 1 z emitorem wanadowym o długości 250 cm. Rozmieszczenie detektorów w zestawie przedstawiono na rys. 2.

- reaktor WWER-1000: 36 zestawów po 6 detektorów: 5 rodowych, 20 cm i 1 wanadowy 350 cm.

#### 2/ Temperatury wewnątrzrdzeniowe

- reaktor WWER-440: 215 termopar chromel-alumel pomiaru temperatury chłodziwa na wlocie z kaset paliwowych,

- reaktor WWER-1000: 151 termopar chromel-alumel pomiaru temperatury chłodziwa na wlocie kaset paliwowych.

Po zakończeniu badań dotyczących zachowania się kabli termoparowych w polu promieniowania reaktorowego przewiduje się zainstalowanie różnicowych termopar w zestawach pomiarów strumieni neutronów.

System INCORMER analizuje także następujące parametry pozardzeniowe:

Parametr lub wielkość	WWER-440	WWER-1000
3. Położenia regulatorów	73	109
4. Obroty pomp cyrkulacyjnych	6 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup>
5. Ciśnienie chłodziwa	6 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup>
6. Różnice ciśnień	6 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup>
7. Temperatury chłodziwa na wlocie do reaktora	6 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup>
8. Przyrost temperatury chłodziwa w rdzeniu	6 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup>
9. Koncentracja kwasu bornego	1 <sup>x</sup>	1 <sup>x</sup>
10. Wielkości bistabilne	200-300	

Rozmieszczenie czujników pomiarów strumieni neutronów i temperatur w rdzeniu reaktora typu WWER jest przedstawione schematycznie na rysunku 2.

Wymienione powyżej czujniki oraz sygnały będą podawane na odpowiednią aparaturę wzmacniająco-normalizującą i przetwarzającą

<sup>x/</sup> W zestawieniu podano ilość wielkości pomiarowych. Ilość czujników może być wielokrotniona.

ca, a następnie na system maszyn cyfrowych. Przetworzona informacja zostaje wyprowadzona na urządzenia peryferyjne systemu.

Opracowywany w IBJ i "Mera-PIAP" system pomiarów wewnątrzrdzeniowych obejmujący aparaturę pomiarową, układ maszyn cyfrowych z odpowiednim oprogramowaniem będzie w pierwszym okresie systemem informacyjnym. System będzie wydawał następujące informacje operatorowi reaktora:

#### 1. Na żądanie:

- rozkłady mocy cieplnej generowanej w rdzeniu,
- marginesy bezpieczeństwa do poziomu mocy, w którym może wystąpić uszkodzenie paliwa,
- bilans paliwa w rdzeniu,
- zestawy wielkości pomiarowych w czytelnym dla operatora formacie;

#### 2. Sygnały ostrzeżenia i alarmu:

- przekroczenia przez parametr lub grupę parametrów ustalonych granic,
- ostrzeżenia i alarmy wraz z informacją o źródle z innych urządzeń reaktora,

#### 3. Sprawozdania:

a/ z przebiegu awarii o zachowaniu się reaktora i działań operatora na 25 min. przed wystąpieniem sygnału awarii i 5 min. po sygnale awarii,

b/ w przypadku wystąpienia sygnału ostrzeżenia lub alarmu o przyczynie wystąpienia sygnału oraz o działaniach operatora,

#### c/ okresowe:

- uśrednione rozkłady mocy generowanej w rdzeniu,
- rozkłady zagłębień regulatorów,
- koncentracja kwasu bornego,
- ciśnieniach i różnicach ciśnień,
- wydatki chłodziwa w każdej pętli chłodzenia,
- bilans paliwa reaktora,
- rozkłady wypaleń paliwa,
- globalna ilość energii wyprodukowanej przez reaktor,

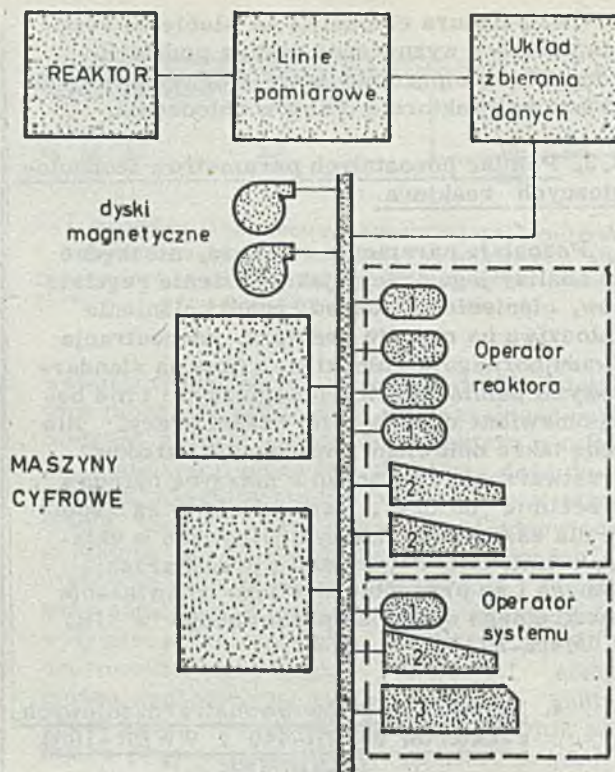
d/ operator może wyprowadzić w formie sprawozdania informacje wyszczególnione w p. 1.

4. Operator systemu INCORMER może w każdej chwili uzyskać informacje o stanie układu i jego oddzielnych elementach.

Cały system INCORMER można podzielić na następujące części:

- część pomiarowa,
- układ maszyn cyfrowych,
- układ prezentacji informacji.

Schemat strukturalny systemu INCORMER ilustruje rys. 3. Najbardziej specyficzną częścią systemu jest część pomiarowa, z tego względu zostanie ona omówiona najbardziej szczegółowo. Pozostałe elementy systemu są standardowymi układami CRPD.



Rys. 3. Schemat strukturalny systemu INCORMER. 1-monitor ekranowy, 2-drukarka mozaikowa, 3-urządzenia we/wy dla nośników informacji cyfrowej.

#### 4. 1. Część pomiarowa systemu INCORMER

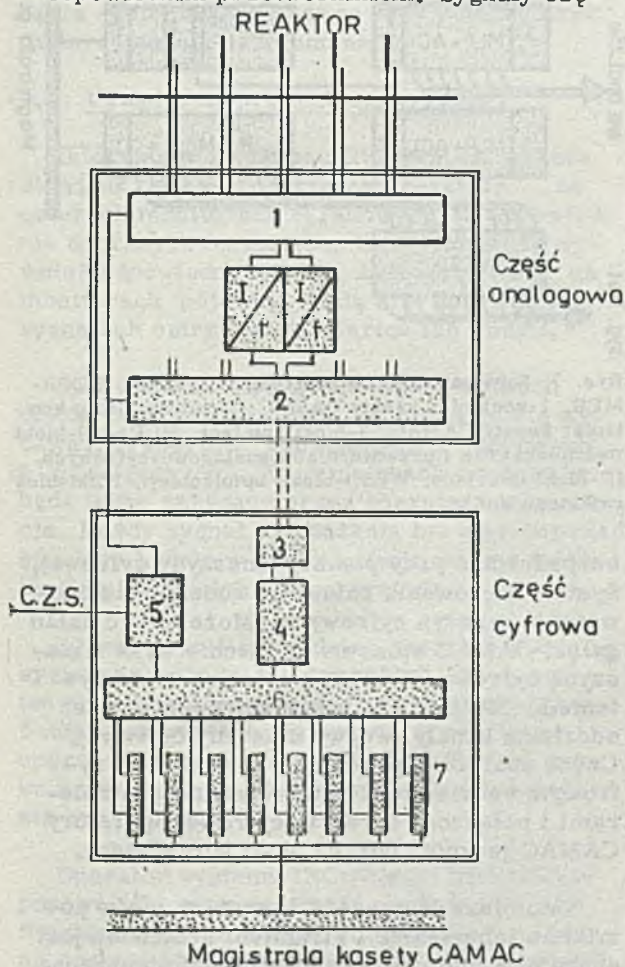
Część pomiarową systemu INCORMER oparto na standardzie CAMAC. Przy przyjęciu do opracowania zdecydowano, że ze względu na specyfikę pomiarów wewnątrzrdzeniowych strumieni neutronów oraz temperatur należy opracować kompletne linie pomiarów tych wielkości, poczynając od sygnału wejściowego a kończąc na magistrali kasy CAMAC. Pozostałe wielkości analogowe jako w pewnej mierze standardowe będą przetwarzane na sygnał analogowy -5 V, a następnie poprzez komutator wejść i przetwornik analogowo-cyfrowy przekazywane na magistralę kasy CAMAC.

Wielkości bistabilne podawane będą na bloki optoizolacji przystosowane do pracy na różnych poziomach sygnałów, skąd przez bloki rejestrów zmian - na magistralę kasy CAMAC. Wszelkie zmiany stanu wejść bistabilnych podawane będą na maszynę cyfrową w reżimie przerwań.

Przy opracowaniu układu przyjęto, że maksymalna częstotliwość otrzymywania informacji z linii analogowych wynosi 1/sekundę. Przerwania z wejść bistabilnych rejestrowane będą z dokładnością 4 ms. Przy realizacji części pomiarowej starano się maksymalnie odłączyć maszynę cyfrową od obsługi linii pomiarowych.

#### 4.1.1. Linie pomiarowe prądów z beta emisyjnych detektorów neutronów

Urządzenia te opracowywane są w Zakładzie Automatyki i Elektroniki Reaktorowej Instytutu Badań Jądrowych. Ideowy schemat układu pomiarowego zawierającego 16 linii pomiarowych przedstawiono na rys. 4. Zasadniczym elementem linii pomiarowej jest przetwornik prąd-częstotliwość. Każdy z dwóch przewodów /żyła efektu i żyła tła/ beta emisyjnego detektora neutronów połączony jest z odpowiednim przetwornikiem. Sygnały czę-



Rys. 4. Schemat linii pomiarowych prądów z beta emisyjnych detektorów neutronów, 1-projektowany przełącznik prądów, 2-przełącznik sygnału  $f$  3-urządzenie izolacji galwanicznej, 4-przelicznik rewersyjny, 5-układ sterujący przełączaniem kanałów, 6-przełącznik rejestrów, 7-rejestry wyjściowe, C. Z. S. -Centralny Zegar Systemu

stotliwościowe doprowadzone są do tzw. części cyfrowej linii, gdzie następuje zliczenie impulsów z odpowiednim znakiem tak, aby wynik pomiaru odpowiadał prądowi netto emitera. Zastosowanie do zliczania bramek czasowych, których wielkość jest wielokrotnością okresu sieci, pozwala na skuteczną eliminację zakłóceń sieciowych.

Podstawowy zespół cyfrowy pomiaru prądów z beta emisyjnego detektora neutronów rejestruje wynik pomiaru z 16 detektorów. W

pierwotnej wersji przełączanie sygnałów odbywało się na poziomie sygnałów częstotliwościowych. Ze względu na koszty wykonania przetwornika prowadzone są prace nad zastosowaniem przełącznika prądów detektorów.

Układ pomiarowy sterowany jest przy pomocy Centralnego Zegara Systemu /CZS/, który generuje sekwencję impulsów bramkujących zsynchronizowaną z częstotliwością sieci. Układ zgłasza zakończenie pomiaru generując sygnał L. Obsługa układu przez maszynę cyfrową ogranicza się do odczytania z rejestrów układu gotowych wyników.

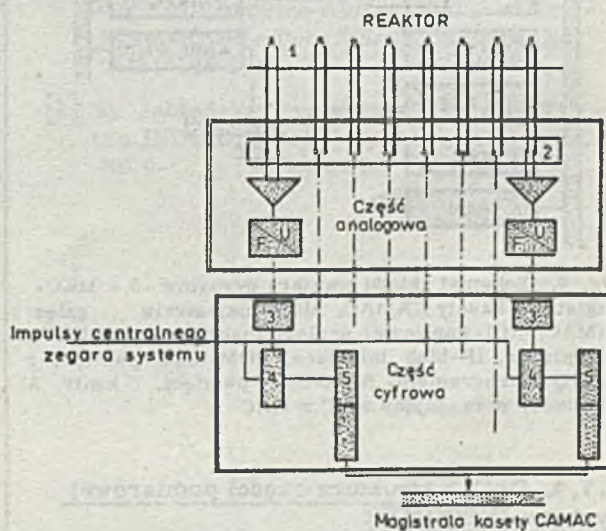
Maszyna może przestawić reżim pracy układu na pomiary kontrolne. W tym przypadku przeprowadzane są pomiary testujące prawidłowość pracy poszczególnych linii.

#### 4.1.2. Układy pomiarów temperatur

Urządzenia te opracowywane są przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP". Tor pomiarów temperatury składa się z 2 części: pomiarowej zawierającej wzmacniacz i przetwornik napięcie-częstotliwość oraz części cyfrowej zawierającej odpowiednie układy zliczające i rejestry. Część cyfrowa jest sterowana przy pomocy Centralnego Zegara Systemu, generującego odpowiednią sekwencję impulsów sterujących. I w tym przypadku zastosowano zasadę zliczania impulsów w okresach czasu, będących wielokrotnością okresu sieci.

Obsługa linii pomiarowych przez maszynę cyfrową ogranicza się do odczytania zawartości rejestrów. Układ może być przełączony odpowiednim rozkazem na testowanie.

Linie pomiarowe montowane są w zespoły po 8 linii i tego typu zespół, składający się z



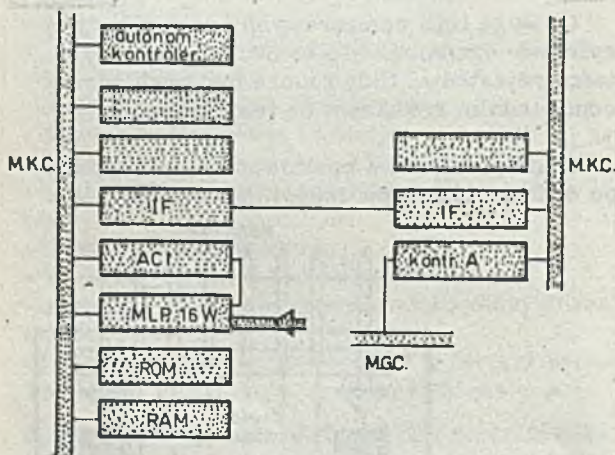
Rys. 5. Schemat linii pomiarowych sygnału z termopar, 1-termostat, 2-blok określający temperaturę zimnych końców termopar, 3-optozłącza, 4-przeliczniki, 5-rejestry wyniku

części pomiarowej i cyfrowej stanowi podstawowy element pomiaru temperatur. Schemat blokowy takiego zespołu przedstawiono na rys. 5.

#### 4.1.3. Pomiar wielkości analogowych $\pm 5v$ .

Sygnaly te będą mierzone przy pomocy przetworników analogowo-cyfrowych, a przełączanie wejść odbywać się będzie przy pomocy multiplexerów. Obsługa multiplexera i przetwornika analogowo-cyfrowego wymaga dużej ilości czasu maszyny cyfrowej. Każdy kanał pomiarowy zgłasza dwa sygnały przerwań. Identyfikacja przerwania, a następnie jego obsługa wymaga rozbudowanych i czasochłonnych czynności.

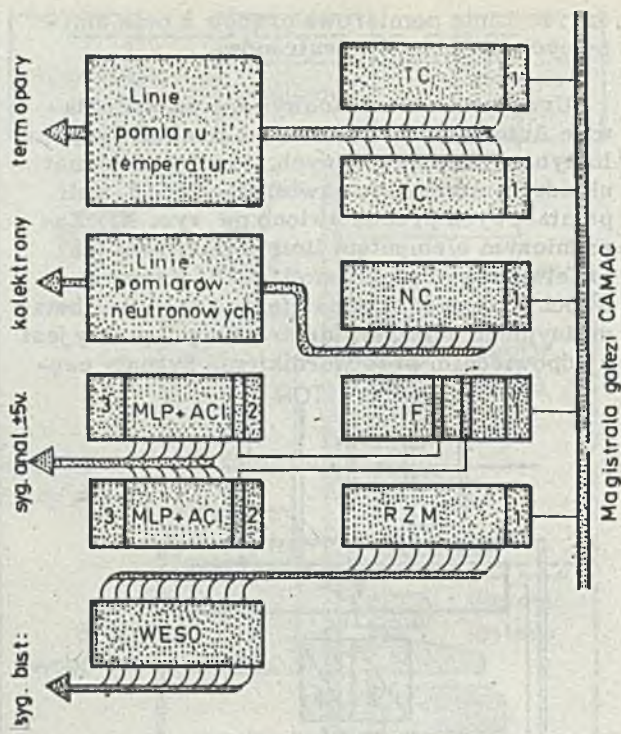
Dla uniknięcia tej trudności zostało zaproponowane oryginalne rozwiązanie [6]: multiplexery i przetworniki analogowo-cyfrowe zostały zgromadzone w kasetach CAMAC obsługiwanych przez własne autonomiczne kontrolery wykorzystujące odpowiednią ilość bloków pamięci. Korzystając z programu wprowadzonego z maszyny cyfrowej lub też programu "zaszytego", układ taki na odpowiedni sygnał przeprowadzi cały cykl pomiarów zapisując wyniki w odpowiednich miejscach własnej pamięci. Poprzez blok interfejsu łączący "autonomiczną kasetę CAMAC" z kasetą sterowaną przez maszynę byłaby prowadzona jedynie transmisja danych. Schemat blokowy takiego układu ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Schemat układu pomiaru sygnałów  $-5v$  MKC -magistrala kasy CAMAC, MGC-magistrala gałęzi CAMAC, ACI-konwerter analogowo-cyfrowy, MLP-multiplexer, IF-blok interface, ROM-blok pamięci z zaszytym programem, RAM-blok pamięci, kontr. A -kontroler sprzęgający MGC z MKC

#### 4.1.4. Ogólna struktura części pomiarowej systemu INCORMER

Układ pomiarowy systemu INCORMER opracowywany w Zakładzie Fizyki Reaktorowej IBJ obejmuje do 7 kaset CAMAC sterowanych



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego systemu INCORMER. 1-kontroler kasy CAMAC, 2-autonomiczny kontroler kasy CAMAC, 3-bloki pamięci, MLP+ACI-bloki multiplexerów i przetworników analogowo-cyfrowych, IF-bloki interface, WESO-bloki optoizolacji, RZM-blok rejestrów zmian

bezpośrednio przy pomocy maszyny cyfrowej. System sterowania zależy od rodzaju zastosowanych maszyn cyfrowych. Może to być układ gałęzi CAMAC stosowanej obecnie wraz z maszyną cyfrową TPA-1001-i do prac nad systemem. Może to być także sterowanie przez oddzielne kanały we/wy maszyny cyfrowej. Część aparatury pracującej w reżimie cyfrowym będzie sterowana własnymi kontrolerami i połączona z resztą cyfrowej aparatury CAMAC jedynie poprzez bloki sprzęgające.

Natomiast duża część aparatury torów pomiarów temperatur i strumieni neutronów jest aparaturą analogową i może być umieszczona w odległości kilkuset metrów od aparatury cyfrowej. Schemat blokowy części pomiarowej systemu INCORMER przedstawiono na rys. 7.

#### 4.2. Układ maszyn cyfrowych systemu INCORMER

Nie ustalono dotychczas typu maszyn cyfrowych, które zostaną zastosowane w systemie INCORMER. Przewiduje się, że będą to dwie maszyny cyfrowe /jedna w gorącej rezerwie/ pracujące z układami pomiarowymi w reżimie "on line" i w czasie rzeczywistym.

Pamięć operacyjna 64k słów 16-bitowych. Dodatkowo przewiduje się zainstalowanie dwóch dysków magnetycznych: jeden do gromadzenia danych z historii eksploatacji dla 30-minutowego sprawozdania poawaryjnego - dru-



gi do gromadzenia danych eksploatacyjnych z całej kampanii paliwowej.

Maszyny te, oprócz podstawowych funkcji zbierania, przetwarzania i prezentacji danych będą prowadziły obliczenia związane z funkcjami specjalnymi. Ze względu na dużą ilość tych obliczeń niezbędne będzie wykonywanie dodatkowych obliczeń przez dużą maszynę cyfrową ośrodka Informatycznego elektrowni jądrowej. Obliczenia te będą wykonywane w reżimie "off line" i wykonująca je maszyna może otrzymywać informacje bądź to przy pomocy łącza systemowego bądź to przy pomocy normalnych nośników informacji.

#### 4.3. Urządzenia prezentacji wyników

Informacja z systemu INCORMER przedstawiona będzie operatorowi reaktora na czterech monitorach ekranowych, w odpowiednio dobranych formatach. Operator może wywołać odpowiedni format. Automatycznie na monitorach pojawiać będą się informacje o sygnałach ostrzeżenia, alarmu lub awarii.

Sprawozdania drukowane będą na dwóch drukarkach mozaikowych. Przewiduje się wydawanie raportów "godzinowych", "dobowych" i "miesięcznych". Na drukarkach drukowane będą także zażądane przez operatora informacje. Każdy sygnał ostrzeżenia lub alarmu przedstawiony będzie w sprawozdaniu wraz z informacjami o działalności operatora.

Sygnał awarii spowoduje przestawienie systemu na program "awaryjny". Program ten powoduje kontynuowanie pomiarów przez 5 minut po wystąpieniu awarii, a następnie uporządkowanie informacji zapisanej na dysku magnetycznym i wydrukowanie sprawozdania awaryjnego.

Operator systemu INCORMER będzie dysponował dla wyprowadzenia odpowiedniej informacji jednym monitorem ekranowym, jedną drukarką mozaikową i jednym urządzeniem wyprowadzenia i wprowadzenia informacji na nośnikach informacji cyfrowej.

## 5. Zakończenie

Przedstawiony materiał z konieczności jest bardzo skrótowy i obrazuje ogólną koncepcję systemu oraz niektóre rozwiązania techniczne. Opracowywane urządzenia są obecnie w stadium modeli laboratoryjnych i przechodzą wszechstronne badania metrologiczne i funkcjonalne zarówno na reaktorach doświadczalnych w Polsce, jak i na reaktorach energetycznych w ZSRR.

Konkretne rozwiązanie systemu będzie wykonywane na konkretne zamówienie danej elektrowni atomowej. Każda elektrownia atomowa jest w zasadzie inna, posiada nieco odmienne wyposażenie, oprzyrządowanie. Dlatego szczegóły oprzyrządowania systemu muszą być przystosowane do konkretnej siłowni.

## Literatura

- [1] S. Chwaszczewski: Oprogramowanie systemu pomiarów wewnętrznych reaktorów WWER-440 i WWER-1000
- [2] F. J. Owczinnikow i in. - Eksploatacja reaktornych ustanowok nowoworoneżskoj AES. Atomizdat. Moskwa 1972
- [3] W. W. Siemienow i in. - Opyt pieregruzok topliwa na nowoworoneżskoj AES i ocenki wygoranija topliwa. Trudy Seminara raboczej grupy po reaktronoi naukie i tiehnikie SEW. Rainsbiereg-Nojgłobsow 1972
- [4] W. E. Browning: Methods of Measuring Temperature in Nuclear Reactors. Progress in Nuclear Energy Series IV, vol 5, Macmillan. New York 1963
- [5] Kelley M. J. : Changes in Emf Characteristics in Chromel-Alumel and Platinum-Platinum Rhodium USAEC Report No TID-7586 1969
- [6] K. Jabłoński: Projekt wstępny podsystemu INCORMER-RP Opracowanie wewn. Nr 0- /IXA/75 IBJ

## OPROGRAMOWANIE SYSTEMU POMIARÓW WEWNĄTRZRDZENIOWYCH

### REAKTORÓW TYPU WWER

#### Wstęp

Jakość i ilość informacji, którą można uzyskać z systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych zależy w dużym stopniu od oprogramowania. Wykorzystanie w pełni dostępnej informacji i przetworzenie jej w informacje, na podstawie których można łatwo podjąć optymalną decyzję - oto cechy, którym powinien odpowiadać nowoczesny system informatyczny w ogóle, w tym i system pomiarów wewnątrzrdzeniowych.

Prace nad oprogramowaniem opracowywanego w Instytucie Badań Jądrowych i Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP" systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktorów typu WWER - systemu INCORMER [1] dopiero się rozpoczęły. Przyjęto zasadę, że standardowe oprogramowanie układu maszyn dotyczące funkcji rezerwacji maszyn, współpracy maszyn z pamięciami masowymi, urządzeniami peryferyjnymi w reżimie przerwań będzie opracowane przez wyspecjalizowane grupy. Także programy obsługi układów pomiarowych w reżimie przerwań i w czasie rzeczywistym są w pewnym sensie programami podstawowymi systemu. Dlatego też, pomimo że już są opracowane algorytmy tych programów, pomimo że są one uruchomione na maszynie cyfrowej TPA-1001-1 - nie będę ich w tym miejscu szczegółowo opisywał.

Niniejsza praca przedstawia tylko koncepcję oprogramowania specjalnego systemu. Koncepcja ta w miarę realizacji może jeszcze ulec znacznym zmianom.

#### 2. Charakterystyka rdzenia reaktora typu WWER

##### 2.1. Rozkłady generacji mocy

Wielkością określającą ilość energii ciepłej produkowanej w określonym punkcie  $r$

reaktora atomowego przy zadanej konfiguracji materiału paliwowego jest strumień neutronów:

$$\phi(E, \vec{r}) = N(E, \vec{r}) \cdot v(E) \quad /1/$$

gdzie:

- $E$  - energia neutronu
- $N(E, \vec{r})$  - gęstość neutronów o energii  $E$  w punkcie  $r$
- $v(E) = \sqrt{\frac{2E}{m}}$  - prędkość neutronu o energii  $E$
- $m$  - masa neutronu

Gęstość mocy generowanej w danym punkcie reaktora wyrażać można następującą relacją:

$$P(\vec{r}) = P_0 \int_0^{E_{max}} \phi(E, \vec{r}) \cdot \Sigma_f(E, \vec{r}) dE \quad /2/$$

gdzie:

$\Sigma_f(E, \vec{r}) = n_f(\vec{r}) \cdot \zeta_f(E)$  makroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie

$n_f$  - koncentracja jąder materiału rozszczepialnego

$\zeta_f(E)$  - mikroskopowy przekrój czynny na rozszczepienie

$P_0$  - energia wydzielana w jednym akcie rozszczepienia

W reaktorze może istnieć stacjonarny rozkład strumienia neutronów, jeśli ilość neutronów powstających w procesie rozszczepienia w reaktorze  $R$  równa jest ilości neutronów, które zostają pochłonięte lub wyjdą poza strefę rdzenia  $G$ .

Stosunek tych wielkości

$$\frac{R}{G} = k \quad /3/$$

jest współczynnikiem mnożenia reaktora. Różnica

$$K-1 = \rho \quad /4/$$

jest określana jako reaktywność reaktora.

Rozkład strumienia w reaktorze można obliczyć rozwiązując równanie opisujące bilans neutronów w reaktorze:

$$[\hat{H}(E, \vec{r}) + \frac{1}{k} \hat{M}(E, \vec{r})] \cdot \phi(E, \vec{r}) = 0 \quad /5/$$

gdzie:

- $\hat{H}(E, \vec{r})$  - operator opisujący ucieczkę i absorpcję neutronów  
 $\hat{M}(E, \vec{r})$  - operator opisujący produkcję neutronów w procesie rozszczepienia

Jest to równanie różniczkowo-całkowe o stopniu zależnym od przyjętego przybliżenia w modelu opisującym zachowanie się neutronów w reaktorze. Do jego rozwiązania niezbędne jest zadanie warunków brzegowych. Na przykład, równanie /5/ przy zastosowaniu przybliżenia dyfuzyjnego przy opisie zachowania się neutronów przyjmuje postać:

$$\nabla D(E, \vec{r}) \nabla \phi(E, \vec{r}) - \Sigma_t(E, \vec{r}) \cdot \phi(E, \vec{r}) + \int \Sigma_s(E' \rightarrow E) \cdot \phi(E', \vec{r}) dE' + \frac{1}{k} f(E) \int \Sigma_f(E', \vec{r}) V(E') \cdot \phi(E', \vec{r}) dE' = 0 \quad /6/$$

gdzie:

- $\nabla$  - operator gradientu;  
 $D$  - współczynnik dyfuzji neutronu  
 $\Sigma_t$  - całkowity makroskopowy przekrój czynny neutronu  
 $\Sigma_s(E \rightarrow E')$  - makroskopowy przekrój czynny na rozproszenie neutronu, przy którym następuje rozproszenie neutronów z energii  $E'$  do energii  $E$   
 $f(E)$  - normowane widmo neutronów rozszczepieniowych  
 $V(E)$  - ilość neutronów emitowanych w jednym akcie rozszczepienia wywołanym neutronem o energii  $E$ .

Warunkami brzegowymi w tym przypadku będzie zerowanie się strumienia na granicy reaktora.

Opisane powyżej równanie jest niczym innym jak równaniem bilansu neutronów. Stojąc przed ostatnią całką współczynnik  $\frac{1}{k}$  występuje tu jako wartość własna i jest niczym innym jak odwrotnością zdefiniowanego relacją /3/ współczynnika mnożenia. Rozwiązaniem równania 6 jest rozkład przestrzennie-energetyczny strumienia neutronów  $\phi(E, \vec{r})$  i wartość własna  $\frac{1}{k}$ .

Rozwiązanie równania /6/ dla współczesnego reaktora energetycznego w przestrzeni trójwymiarowej jest nawet dla bardzo dużych maszyn cyfrowych zadaniem bardzo pracochłonnym. Wykorzystując wyniki obliczeń przygotowawczych maszyna cyfrowa o pojemności pamięci operacyjnej rzędu 256 K słów 64 bitowych o szybkości działania rzędu 1 mln operacji/s dokonuje końcowych obliczeń w czasie rzędu godziny.

## 2.2. Efekty reaktywnościowe w rdzeniu reaktora

Reaktory energetyczne typu WWER posiadają zapas paliwa, który musi wystarczyć na

okres pracy do 7500 godzin. Zapas ten zgromadzoły w rdzeniu reaktora bez odpowiedniego skompensowania, utworzyłby układ nadkrytyczny, w którym  $\beta \gg 0$ . Hipotetyczną wielkość  $\beta$  dla takiego rdzenia nazywamy reaktywnością wbudowaną albo całkowitym zapasem reaktywności. Oczywiście ten zapas reaktywności musi być skompensowany wprowadzeniem odpowiednich absorberów neutronów w postaci elementów regulacyjnych, a we współczesnych reaktorach WWER - w postaci roztworu kwasu borowego /bor jest silnym pochłaniaczem neutronów/ w chłodziwie. Zmiana reaktywności układu przy wprowadzeniu prętów regulacyjnych nazywa się reaktywnością elementów regulacyjnych, natomiast zmianę reaktywności układu przy wprowadzeniu kwasu borowego określa się jako zmianę reaktywności na jednostkową koncentrację  $H_2BO_3$  w g/litr.

Rdzeń reaktora typu WWER pracuje w temperaturze do 300°C. W tej temperaturze woda zmienia znacznie swoją gęstość do 0,7 g/cm<sup>3</sup>. Oczywiście, wpływa to na współczynnik mnożenia. Tak samo produkcja energii cieplnej w elementach paliwowych podnosi znacznie /do 1000-2000°C/ temperaturę paliwa i wpływa na parametry neutronowe rdzenia. Te wszystkie efekty odbijają się na reaktywności. Zmianę reaktywności przy podniesieniu temperatury z 20°C do nominalnej nazywamy temperaturowym efektem reaktywności. Zmianę reaktywności przy osiągnięciu przez reaktor pełnej mocy nazywamy efektem reaktywnościowym mocy.

Podczas pracy reaktora, w wyniku rozszczepień zmniejsza się ilość atomów paliwa, powstają nowe atomy z produktów rozszczepienia. Z całego szeregu izotopów powstających z produktów rozszczepienia powstają izotopy Xe-135 i Sm<sup>149</sup>, które mają bardzo duży przekrój czynny na pochłanianie neutronów, jednakże nie są izotopami stabilnymi. Izotopy te pod wpływem neutronów ulegają przekształceniom radioizotopowym. Dlatego też przy stabilnej pracy reaktora ustala się określony poziom tych izotopów wprowadzając stałą ujemną reaktywność nazywaną reaktywnością zatrucia ksenonem i reaktywnością zatrucia samarem.

Zmniejszenie ilości atomów paliwa, gromadzenie stacjonarnych produktów rozszczepienia w procesie produkcji energii cieplnej w reaktorze powoduje pojawienie się ujemnej reaktywności nazywanej reaktywnością wypalenia.

Wielkości te, aczkolwiek są przedmiotem obliczeń i analiz, w okresie konstruowania reaktora ostatecznie są określane z danych eksploatacyjnych.

## 2.3. Krytyczne parametry pracy reaktora

Energia cieplna w reaktorze jest generowana w rdzeniu elementu paliwowego wykonanego w postaci tabletki ze spiekanego dwutlen-

ku uranu. Tabletki te umieszczone są w rurce wykonanej ze stopu cyrkonu /99%/ i niobu /1%/. W czasie pracy rdzeń paliwa osiąga temperaturę bliską temperaturze topnienia /2800 C/. Dodatkowo, duża generacja ciepła w elemencie paliwowym może doprowadzić do powstania wrzenia objętościowego wody chłodzącej, przy którym nastąpi oderwanie się warstwy wody chłodzącej od ścianki elementu paliwowego. Efekt ten nazywa się kryzysem wymiany ciepła.

Zarówno stopnienie się rdzenia elementu paliwowego, jak i kryzys wymiany ciepła prowadzi do uszkodzenia elementu paliwowego. Procentowe podniesienie mocy w danym rejonie reaktora do wartości, przy których może wystąpić topnienie paliwa lub kryzys wymiany ciepła nazywamy marginesem do wystąpienia krytycznych wartości generacji mocy cieplnej.

### 3. Oprogramowanie systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych INCORMER

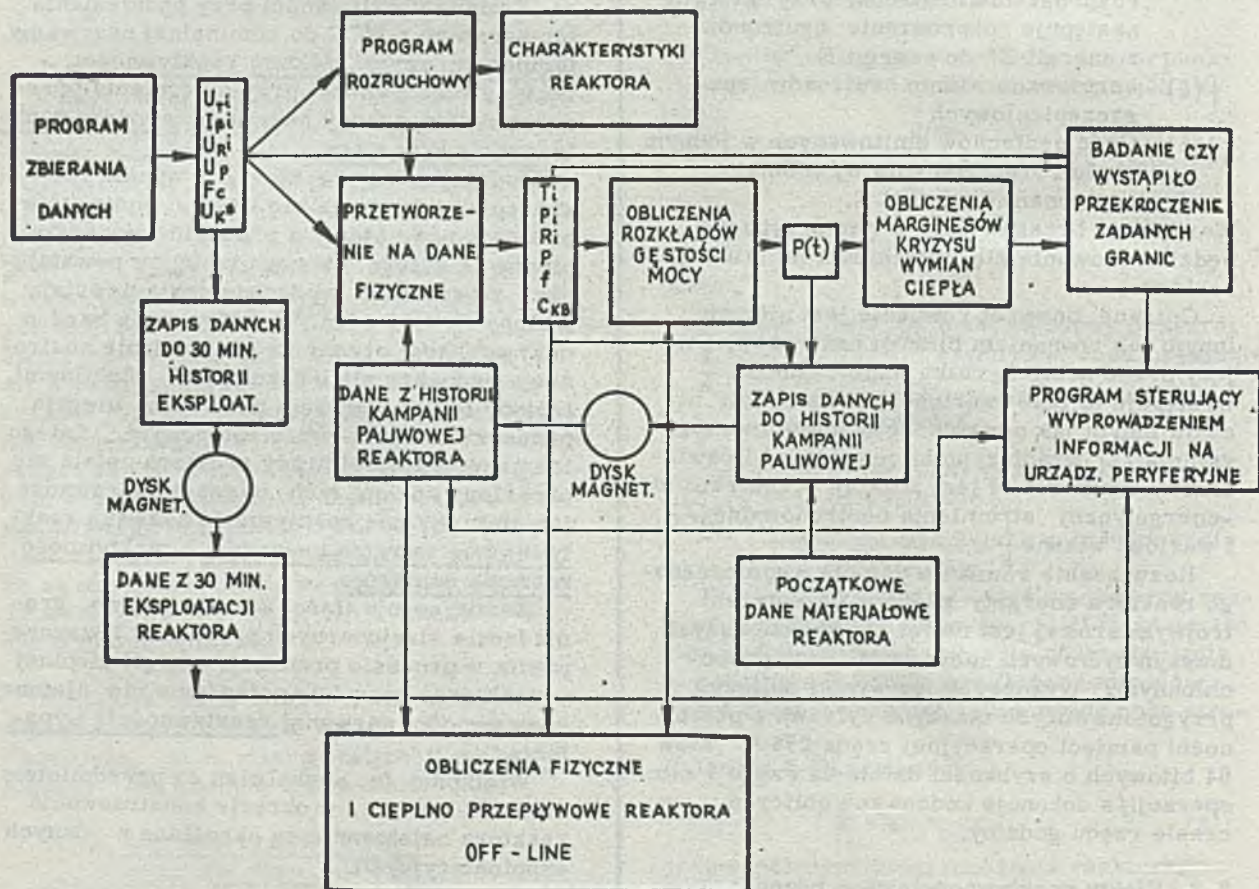
Struktura proponowanego do opracowania oprogramowania systemu jest przedstawiona na rys. 1.

System otrzymuje z układów pomiarowych, obsługiwanych programem zbierania danych, informację o parametrach pracy reaktora. Informacja ta przychodzi w formie binarnej, określającej wielkość sygnału elektrycznego odpowiadającego danej wielkości. Informacja ta w wielu przypadkach jest uzupełniona informacją o stanie linii pomiarowych /układy pomiarów prądów z beta-emisyjnych detektorów neutronów oraz układy pomiarów napięć termopar/.

System uzyskuje informację z następujących czujników:

- termopar umieszczonych wewnątrz rdzenia i na głównych obiegach chłodzenia reaktora,
- beta emisyjnych detektorów neutronów,
- czujników ciśnień i różnic ciśnień na głównych obiegach reaktora,
- czujników ilości obrotów głównych pomp cyrkulacyjnych,
- czujników położzeń elementów regulacyjnych,
- czujnika koncentracji kwasu borowego.

O ile w przypadku czujników temperatury, ciśnień, różnicy ciśnień, ilości obrotów pomp określających przepływ masowy chłodziwa przez reaktor, położzeń elementów regula-



Rys. 1. Struktura oprogramowania systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych INCORMER

cyjnych, koncentracji kwasu borowego można ustalić jednoznacznie relację pomiędzy informacją a parametrem pracy reaktora, o tyle relacja taka nie istnieje dla beta-emisyjnych detektorów neutronów. Wielkość prądu detektora w reżimie ustalonym jest określona przez dość skomplikowaną funkcję strumienia neutronów [2].

$$I = f[\phi, CE, \tau] \quad /7/$$

Moc cieplna generowana w reaktorze jest funkcją strumienia neutronów określona wzorem [1]. I, niestety, do wyznaczenia relacji  $P = f(I)$  należy określić widmo energetyczne strumienia neutronów w danym rejonie reaktora /widmo to zależy od wzbogacenia paliwa, stopnia tego wypalenia, koncentracji kwasu borowego w chodzie/ i opracować tablice lub funkcje  $f[W, B, C]$  w zależności:

$$P = K \cdot f(W, B, C) \cdot I \quad /8/$$

gdzie:

- K - współczynnik wydajności detektora
- $f(W, B, C)$  - funkcja określająca zależność współczynnika wydajności od wzbogacenia paliwa W, wypalenia B i koncentracji kwasu borowego C
- I - prąd detektora

I właśnie drugi człon oprogramowania, oprócz standardowych obliczeń relacji między sygnałami z odpowiednich czujników a wielkościami temperatur, ciśnień, przepływów, położenia elementów regulacyjnych - musi przeprowadzać obliczenia gęstości mocy generowanych w miejscach, gdzie umieszczone są beta-emisyjne detektory neutronów, na podstawie danych o wielkości prądu generowanego przez czujnik. Obliczenia takie muszą być przeprowadzone na podstawie danych materiałowych reaktora oraz aktualnych warunków pracy reaktora i dlatego ten blok programowy otrzymuje informację o aktualnym stanie reaktora. Wielkość K wyznacza się na podstawie wyników pomiarów rozruchowych reaktora, o których będzie mowa poniżej.

### 3.1. Określenie rozkładu generowanych mocy i marginesów wystąpienia warunków krytycznych

Czujniki strumienia neutronów są rozmieszczone w kilkudziesięciu kasetach reaktora i tylko w tych punktach może być określona gęstość mocy. Dla określenia rozkładów mocy generowanej w całym reaktorze przyjęto metodę opartą na dopasowaniu obliczonych off-line rozkładów gęstości generowanej mocy do wielkości pomiarowych. Obliczenia takie będą wykonane na dużej maszynie cyfrowej ośrodka informatycznego elektrowni jądrowej na podstawie danych materiałowych i danych z historii kampanii paliwowej, dostarczanych przez odpowiedni blok programowy.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń będą przekazane bądź to specjalnym łączem, bądź

to przy pomocy odpowiednich nośników informacji do systemu maszyn cyfrowych pracujących "on-line". Tam zostanie przeprowadzone dopasowanie obliczonego rozkładu gęstości generowanych mocy do wielkości określonych na podstawie wskazań beta-emisyjnych detektorów neutronów.

Uzyskany w ten sposób rozkład generowanych mocy jest weryfikowany poprzez wskazania termopar. Mianowicie przyrost temperatury chłodziwa przy przejściu przez rdzeń reaktora jest proporcjonalny do wielkości mocy przekazywanej do danego kanału chłodzenia. W przypadku większych niezgodności należy przeanalizować powstałą sytuację i przedsięwziąć odpowiednie środki zapobiegawcze. W przypadku odchylenia wskazań jednej termopary, po sprawdzeniu prawidłowości pracy linii pomiarowej, należy założyć zdławienie przepływu w danym kanale.

Duża maszyna cyfrowa, przeprowadzając obliczenia "off-line", przeprowadza także obliczenia dopuszczalnych wielkości gęstości wydzielanych mocy z punktu widzenia niedopuszczenia do krytycznych parametrów cieplnych. Analiza marginesów jest wykonywana dla najbardziej obciążonego energetycznie kanału chłodzenia reaktora. Niezbędne do obliczeń wielkości przepływów są wyznaczone na podstawie wyników pomiarów, różnic ciśnień chłodziwa na rdzeniu reaktora i na podstawie wyników pomiarów ilości obrotów głównych pomp cyrkulacyjnych, które przy znanej charakterystyce pomp określają wielkość przepływów przez cały reaktor.

### 3.2. Wyznaczenie bilansów reaktywności reaktora

Bilans reaktywności reaktora jest parametrem określającym okres, przez który reaktor może pracować bez doładunku paliwa, lub też dopuszczalne zmiany globalnej mocy reaktora. W stanie ustalonym, przy osiągnięciu równowagi zatrucia ksenonem i samarem powinien być spełniony warunek bilansu reaktywności:

$$\text{gdzie: } \beta_T + \beta_P + \beta_{Xe} + \beta_{Sm} + \beta_B = \beta_{WB} + \beta_{ER} + \beta_{KB}$$

- $\beta_T$  - reaktywnościowy efekt temperatury
- $\beta_P$  - reaktywnościowy efekt mocy
- $\beta_{Xe}$  - reaktywność ksenonu
- $\beta_{Sm}$  - reaktywność samaru
- $\beta_B$  - reaktywność wypalenia
- $\beta_{WB}$  - reaktywność wbudowana
- $\beta_{ER}$  - reaktywność elementów regulacyjnych
- $\beta_{KB}$  - reaktywność kwasu borowego

Podany powyżej bilans reaktywności tylko na pierwszy rzut oka jest relacją bardzo prostą. W rzeczywistości relacje są bardziej skomplikowane. Na przykład obecność kwasu borowego w moderatorze zmienia wielkość reaktywnościowego efektu temperatury. Dlatego też, przy wyznaczeniach poszczególnych składowych należy brać pod uwagę i inne warunki pracy reaktora.

Reaktywność temperatury, mocy, ksenonu, samaru i wypalenia mogą być wyznaczone na podstawie obliczeń opartych na aktualnych danych eksploatacyjnych reaktora. Z drugiej strony, może być wyznaczona reaktywność elementów regulacyjnych i reaktywność kwasu bornego w reaktorze. Zbilansowanie się reaktywności świadczy o prawidłowości wykonywanych obliczeń i jest jednym z kryteriów prawidłowości pracy części pomiarowej i oprogramowania systemu INCORMER.

### 3.3. Program pomiarów rozruchowych reaktora

W planach rozwoju systemu INCORMER przewidziano rozszerzenie jego funkcji na pomiary podczas rozruchu różnorodnych parametrów eksploatacyjnych, jak np.: współczynniki reaktywnościowe, efekty reaktywnościowe. Jednakże część pomiarów rozruchowych jest niezbędna dla zapewnienia prawidłowej pracy systemu.

A więc przy rozruchu reaktora przeprowadza się skalowanie termopar. W procedurze rozruchu przewidziano stopniowe nagrzewanie obiegu bez doprowadzania mocy z reaktora. W tym przypadku wszystkie termopary znajdują się w stałej i dość dokładnie znanej temperaturze. Przeprowadzając pomiary przy różnych temperaturach chłodziwa można uzyskać charakterystyki wszystkich termopar.

W początkowym okresie pracy reaktora jest wyznaczony współczynnik  $K$  we wzorze /8/. Mianowicie: z bilansu ciepła określona jest globalna moc reaktora, która z drugiej strony jest wyznaczana na podstawie danych z beta emisyjnych detektorów neutronów i odpowiednich obliczeń. Oczywiście, w drugim przypadku moc ta jest określona z dokładnością do wielkości  $K$ , uzyskaną właśnie na podstawie tych pomiarów. Kilka razy w ciągu kampanii paliwowej reaktora porównania takie są powtarzane, a ich wynik jest miarą prawidłowej pracy systemu INCORMER.

### 3.4. Program rejestracji historii kampanii paliwowej

Kampania paliwowa reaktora WWER trwa trzy lata z tym, że co roku doładowuje się średnio 1/3 nowego paliwa i odpowiednia część paliwa zostaje usunięta z reaktora. 2/3 paliwa pozostającego w reaktorze jest przenoszone na inne miejsce w rdzeniu.

W celu opracowania schematu przeładunku paliwa niezbędna jest znajomość stopnia wypalenia paliwa w poszczególnych kasetach. Taka informacja jest gromadzona przez system INCORMER na jednym z dysków magnetycznych i wydawana w miesięcznych sprawozdaniach z pracy reaktora.

Program ten prowadzi także ewidencję re-sursów pracy w reaktorze poszczególnych elementów rdzenia: elementów regulacyjnych, beta emisyjnych detektorów neutronów. Dane te są wykorzystywane zarówno do różnorodnych obliczeń jak i do określenia konieczności wyniany danego urządzenia.

### 3.5. Inne programy

Poza opisanymi powyżej programami system INCORMER musi być wyposażony w szereg programów wypełniających bardziej podstawowe funkcje systemu. Są to: program prezentacji danych na urządzeniach peryferyjnych, program generacji alarmów i ostrzeżeń przy przekroczeniu zadanych granic, program przygotowania danych do sprawozdania poawaryjnego i nie przedstawiony na schemacie program przełączania maszyny wykonującej obliczenia na maszynę będącą w rezerwie. Są to programy stosowane powszechnie w systemach CRPD i dlatego nie będą tu bardziej szczegółowo omówione.

### 4. Zakończenie

W przedstawionej koncepcji oprogramowania systemu INCORMER, systemu informacyjnego, który może pracować samodzielnie, ale może też współpracować z systemem CRPD całej elektrowni jądrowej - starałem położyć nacisk na funkcje specjalne systemu. Na to, że system ten na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyprowadza informacje o niemierzalnych parametrach, parametrach bardzo istotnych dla eksploatacji reaktora energetycznego a niemożliwych do uzyskania przy pomocy innych urządzeń, i to, moim zdaniem, jest głównym atutem systemu pomiarów wewnętrzzdzeniowych.

Oczywiście, przedstawione tu oprogramowanie jest pierwszym krokiem w rozwoju systemu INCORMER. Przewiduje się powierzenie systemowi funkcji doradczych, weryfikacyjnych decyzji operatora, a w końcu funkcji bezpośredniego sterowania przestrzennym rozkładem generowanych w reaktorze mocy. Jednakże nie przewiduję, że system ten zostanie włączony w wysokie stopnie zabezpieczeń reaktora. Pozostaną tam tradycyjne układy kontroli i zabezpieczeń reaktora.

Literatura

- [ 1 ] S. Chwaszczewski - Komputerowy system pomiarów wewnętrzzdzeniowych reaktorów WWER-440 i WWER-1000
- [ 2 ] P. Gebureck et al. - Development and in core application of self-powered neutron detectors. Nuclear Power Plant Control and Instrumentation Proceedings of a Symposium IAEA, Vienna, 1973.

## INCORMER-T – KOMPUTEROWY PODSYSTEM POMIARU TEMPERATURY

### WEWNĄTRZ RDZENIA REAKTORA ENERGETYCZNEGO

#### 1. Wstęp

W Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP" na zlecenie i we współpracy z Instytutem Badań Jądrowych w Świerku realizowany jest podsystem pomiaru temperatury wewnątrz rdzenia reaktora - INCORMER-T. Podsystem ten wchodzi w skład komputerowego systemu INCORMER, którego zadaniem jest centralna rejestracja i przetwarzanie wyników pomiarów parametrów wewnątrz rdzeniowych reaktorów energetycznych typu WWER-440 i WWER-1000. Podsystem INCORMER-T różni się dosyć istotnie od typowych przemysłowych systemów CRPD ze względu na specjalne, bardzo trudne wymagania wynikające z jego przeznaczenia.

Niniejszy artykuł poświęcony jest głównie przedstawieniu tych wymagań i scharakteryzowaniu środków podjętych przez konstruktorów w celu sprostania tym wymaganiom.

#### 2. Przeznaczenie podsystemu

##### INCORMER-T

Podsystem INCORMER-T wchodzący w skład systemu INCORMER przeznaczony jest do pomiaru temperatury w ok. 160 punktach rdzenia reaktora energetycznego. Wyniki pomiarów przesyłane są do komputera, gdzie po przetworzeniu na podstawie odpowiedniego programu [4], dają informację o przestrzennym rozkładzie generowanej w reaktorze energii cieplnej i ewentualnych lokalnych przekroczeniach dopuszczalnych mocy.

Na podstawie tych informacji mogą być podjęte odpowiednie decyzje operatorskie, mające na celu optymalnie intensywną eksploatację reaktora. Umożliwia to zwiększenie efektywności ekonomicznej elektrowni, a także poprawę bezpieczeństwa eksploatacji reaktora. Już z tego pobieżnego przedstawienia widać, jak ważne i odpowiedzialne zadania spoczywają na podsystemie INCORMER-T. Z tego też względu wymagania przed nim stawiane są bardzo

trudne. Obszernemu omówieniu roli parametrów wewnątrzrdzeniowych poświęcony jest referat [3].

#### 3. Główne wymagania stawiane podsystemowi INCORMER-T

Najogólniej biorąc, podsystem INCORMER-T: musi spełniać cztery zasadnicze wymagania:

- wysoka niezawodność pracy systemu,
- duża dokładność pomiaru temperatury,
- wysoka i długotrwała stabilność parametrów metrologicznych w ciężkich warunkach eksploatacji,
- bardzo wysoka odporność na wszelkie zakłócenia panujące w dużej elektrowni atomowej.

Dodatkowo, ze względu na prawidłową interpretację wyników, postawiono wymaganie jednoczesności pomiaru temperatury we wszystkich ok. 160 punktach.

Ponieważ system INCORMER ma być eksploatowany na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych, wymagane jest aby był on w pełni nowoczesny i zgodny z międzynarodowymi standardami interfejsów komputerowych.

#### 4. Specyficzne cechy i parametry podsystemu INCORMER-T

Wysokie wymagania stawiane podsystemowi INCORMER-T zmuszają do wyboru metody pomiaru oraz zastosowania odpowiednich technik, w celu zapewnienia jego niezawodności, stabilności i niezakłócalności. Poniżej przedstawione zostaną specyficzne cechy i parametry metrologiczne modelu podsystemu INCORMER-T.

##### Metoda pomiaru

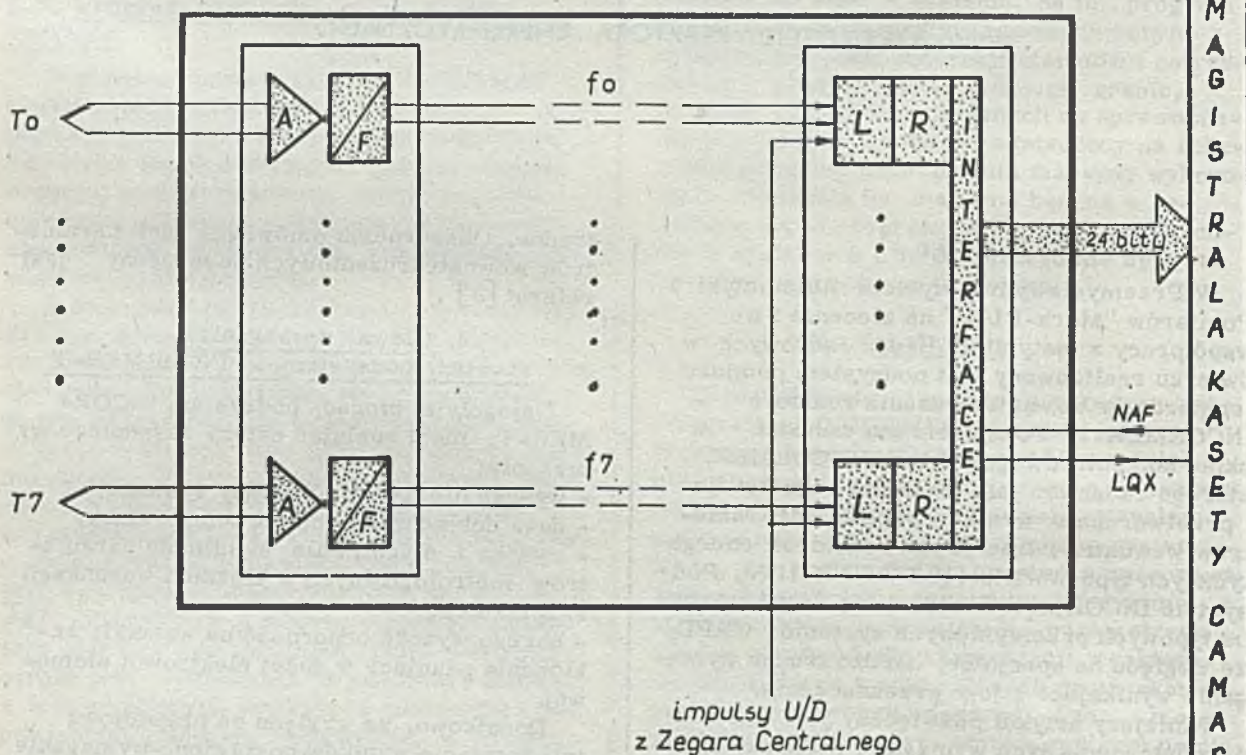
Zastosowano częstotliwościową metodę przetwarzania analogowo-cyfrowego [6]. Polega ona na przetworzeniu na częstotliwość wzmocnionego sygnału proporcjonalnego

do temperatury, generowanego przez termoelement umieszczony przy wylocie chłodziwa z rdzenia reaktora. Sygnał częstotliwościowy przetwarzany jest na liczbę impulsów proporcjonalną do sygnału wyjściowego termoelementu, a więc pośrednio - do temperatury. Pomiar odbywa się cyklicznie co 1 sekundę, wynik każdego pomiaru przechowywany jest w pamięci buforowej, a następnie na żądanie przekazywany do komputera, gdzie zgodnie z programem podlega przetworzeniu /Rys. 1/.

ność toru pomiarowego.

#### Sygnalizacja niesprawności

Aby uzyskać dalsze podwyższenie niezawodności i wiarygodności wyników pomiarów zastosowano dwustopniową sygnalizację niesprawności każdego toru pomiarowego podsystemu. W tym celu informacja wyjściowa w postaci 12-bitowego słowa przekazywanego przez każdy tor pomiarowy do komputera zawiera oprócz 10-bitowego wyniku pomiaru



Rys. 1. Schemat strukturalny modułu podsystemu INCORMER-T:  $T_0 \dots T_7$  - termoelementy pomiarowe, A, F - układy wzmacniająco-przetwarzające, L - liczniki, R - rejestry buforowe

#### Autostabilizacja

W celu uzyskania wysokiej stabilności parametrów metrologicznych podsystemu zastosowano specjalną, oryginalną metodę autozerowania dryftu czasowego i temperaturowego aparatury pomiarowej, tj. wzmacniaczy i przetworników analogowo-cyfrowych. Dzięki temu zamiast wysokostabilnych i bardzo drogich wzmacniaczy z przetwarzaniem i innych stabilnych elementów można było zastosować popularne liniowe elementy scalone.

#### Autotestowanie

W celu podwyższenia niezawodności pracy podsystemu i wiarygodności wyników pomiaru zastosowano autotestowanie torów pomiarowych. Polega ono na sterowanym programowo przełączeniu wejścia toru z zewnętrznego źródła mierzonego, tj. termoelementu, na wewnętrzne wysokostabilne źródło sygnału kalibracyjnego. Analiza wyniku pomiaru kalibracyjnego pozwala wykryć ewentualną niespraw-

również 2 bity określające "prawidłowość" tego wyniku. Poniższa tabelka obrazuje przyjętą interpretację tych bitów przy ocenie wyniku pomiaru:

bit 11-ty	bit 12-ty	interpretacja
1	1	wynik prawidłowy /tor sprawny/
0	1	wynik niepewny /tor podejrzany o niesprawność/
0	0	wynik nieprawidłowy /tor niesprawny/
1	0	wynik pomiaru testowego /test toru/

#### Uwagi

- 1/ Przekroczenie /zarówno od dołu jak i od góry/ dopuszczalnego zakresu pomiaru sygnalizowane jest jako wynik nieprawidłowy.
- 2/ W przypadku sygnalizacji wyniku niepewnego należy automatycznie wykonać programową procedurę autotestowania /tj. pomiar testowy i interpretację jego wyniku/.



## Tłumienie zakłóceń

Ze względu na rodzaj sygnału mierzonego i jego niski poziom odporność na wszelkiego rodzaju sygnały zakłócające odgrywa szczególnie ważną rolę w podsystemie INCORMER-T. Termoelement jest źródłem sygnału napięciowego, a więc łatwo zakłócalnego. Poziom tego sygnału dla podsystemu INCORMER-T wynosi od ok. 5 do ok. 15 mV/temperatura mierzona: od 128°C do 384°C/. Rozdzielczość toru pomiarowego wynosi 10 μV/0,25°C/. Półcłowe określenie wymagań na odporność zakłóceń jest trudne ze względu na niepełną znajomość obiektu, tj. elektrowni atomowej. W wyniku dyskusji autora ze specjalistami radzieckimi z Instytutu im. Kurczatowa i po wstępnym zapoznaniu się z warunkami pracy w Nowo-Woroneżskiej Elektrowni Atomowej [5] przyjęto, że tory pomiarowe INCORMER-T winny być odporne na zakłócenia o charakterze sygnału szeregowego, tj. nałożonego na sygnał mierzony /ang. series-mode-voltage/ do poziomu 70 mVpp przy częstotliwości 50 Hz oraz do poziomu 270 mVpp przy częstotliwości 100 kHz. Wynika stąd wymagany Współczynnik Tłumienia Sygnału Szeregowego SMRR = 77 dB /dla typowych systemów CRPD wynosi on 40 dB a więc ok. 100 razy mniej/. Należy nadmienić, że mamy tu do czynienia z tzw. odbiorem sygnału poniżej szumu w terminologii teorii komunikacji, gdyż stosunek sygnału do szumu wynosi 1:14 /5 mV do 70 mV/ dla 50 Hz oraz 1:54 /5 mV do 270 mV/ dla 100 kHz. Ponadto wejście toru jest narażone na silne zakłócenia o charakterze sygnału wspólnego /ang. common-mode voltage/, których poziom może dochodzić do 500 V. Wynika stąd wymagany Współczynnik Tłumienia sygnału wspólnego CMRR > 140 dB /dla typowych systemów CRPD wynosi on 100 - 120 dB/.

Aby osiągnąć tak wysoką odporność na zakłócenia, zastosowano:

- bierną filtrację dolnoprzepustową na wejściu torów pomiarowych,
- analogowo-cyfrową integrację napięcia wejściowego, tj. sumy sygnału mierzonego i zakłócającego /okres integracji jest synchronizowany z okresem sieci energetycznej 50 Hz/,
- symetryczne wejście toru pomiarowego,
- optyczną izolację części analogowej połączonej z termoelementem od części cyfrowej połączonej z komputerem.

Uzyskano w ten sposób tzw. "pływające wejście" toru pomiarowego.

## 5. Parametry metrologiczne INCORMER-T

### Wejście

- Sygnał mierzony: napięcie stałe pochodzące z termoelementu chromel-alumel o czułości ok. 40 μV/°C
- Zakres sygnału wejściowego: 10 mV tzn. od 5 do 15 mV, odpowiadający temperaturze od 128 do 284°C
- Rezystancja źródła mierzonego: do 2 kohm
- Rodzaj wejścia: symetryczne "pływające"

### Wyjście

- Słowo 12-bitowe /2 x 12 = 24-bitowe dla 2 torów/, w którym 10 bitów odpowiada wartości mierzonej temperatury, a 2 bity sygnalizują stan sprawności aparatury toru pomiarowego /zgodnie z powyższą tabelką/

Rozdzielczość: 1 : 1024 tzn. kwant Q = 10 μV

Błąd pomiaru: δ = ±0,1% zakresu -10 μV

Niestabilność temperaturowa: δ<sub>t</sub> = 10 μV/10°C zmian temperatury otoczenia

Czas trwania pomiaru: 0,9 s

Cykl pomiarowy: 1 s /pomiaru we wszystkich torach odbywają się jednocześnie/.

Odporność zakłóceńowa

- Współczynnik Tłumienia Sygnałów Nałożonych SMRR = 77 dB

- Współczynnik Tłumienia Sygnałów Wspólnych CMRR > 140 dB

Warunki klimatyczne

- temperatura pracy: 5 do 60°C

- ciśnienie atmosferyczne: 600 do 900 mm Hg

- wilgotność względna: 30 do 80% Ww, przy czym część aparatury związana bezpośrednio z obiektem znajduje się w obudowie wodoszczelnej.

## 6. Sprzężenie podsystemu INCORMER-T z komputerem

Sprzężenie oparte jest na standardach systemu interfejsu CAMAC przyjętego w resorcie energii atomowej jako obowiązujący w kraju /PN-72/T-06530/. System CAMAC umożliwia sprzężenie torów pomiarowych podsystemu INCORMER-T z dowolnym komputerem - przy zmianie typu komputera konieczna jest tylko wymiana jednego bloku, tzw. adapteru interfejsu CAMAC-KOMPUTER. Należy zaznaczyć, że większość komputerów, np. serii PDP, Odra 1325 i węgierskie komputery serii TPA /z których TPA-1001 jest obecnie wykorzystywany w systemie INCORMER/ jest wyposażona w adapter interfejsu. Podsystem INCORMER-T komunikuje się z systemem INCORMER poprzez magistralę kasyety CAMAC i blok sprzężenia kasyety z systemem.

Sprzężenie realizowane jest za pomocą następujących rozkazów i sygnałów CAMAC.

Rozkazy N. A. F.	Interpretacja
N. 0.0.	Odczyt wyniku pomiaru w torze TO i T1
N. 1.0.	Odczyt wyniku pomiaru w torze T1 i T3
N. 2.0	Odczyt wyniku pomiaru w torze T4 i T5
N. 3.0	Odczyt wyniku pomiaru w torze T6 i T7
N. 0.8	Testowanie zgłoszenia L/Q = L/
N. 0.10	kasowanie zgłoszenia L
N. 0.25	wykonanie jednego pomiaru testowego
N. 0.26	otwarcie bramek U liczników
N. 0.24	zamknięcie bramek U liczników
N. 1.26	otwarcie bramek D liczników
N. 1.26	zamknięcie bramek liczników

### Sygnaly

Zgłoszenie L: generowane w momencie ukończenia pomiarów n-tego cyklu i wpisania ich wyników do rejestrów buforowych na miejsce wyników n-1 cyklu

Sygnal O: generowany w czasie realizacji rozkazów N. A. F.

Sygnal X: generowany po zdekodowaniu rozkazów N. A. F.

Sygnal Z: kasuje wszystkie rejestry i sygnal L

Sygnal I: blokuje bramki U i D liczników.

### Styki indywidualne

P1 i P2 - nie wykorzystywane

P3 i P4 - wejścia na bramki U i D sygnałów sterujących z Zegara Centralnego systemu INCORMER

P5 - przełącza sterowanie bramek U i D z Zegara Centralnego na rozkazy N. 0. 26 i N. 0. 24.

### Obsługa programowa

Obsługa podsystemu INCORMER-T ze strony komputera systemu INCORMER jest nadzwyczaj prosta i sprowadza się jedynie do zorganizowania odczytu wyników pomiarów zawartych w rejestrach buforowych poszczególnych torów podsystemu. Potrzeba obsługi sygnalizowana jest zgłoszeniem, pojawiającym się cyklicznie co ok. 900 ms, synchronicznie z Zegara Centralnego.

**mgr inż. BOGDAN FILIPIAK**

**mgr inż. KAZIMIERZ MLIICKI**

Instytut Badań Jądrowych

Zakład Ochrony przed Promieniowaniem

Świerk

## KONCEPCJA NOWEGO SYSTEMU DOZYMTRYCZNEGO

### ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM WWER-440

#### 1. Wstęp

Budowane obecnie poza granicami ZSRR elektrownie z reaktorami WWER wyposażone są w układy dozymetryczne nie będące przedmiotem kompleksowej dostawy ZSRR /NRD, Finlandia/. Z dotychczasowych rozmów wstępnych ze stroną radziecką wynika celowość opracowania projektu i wykonania układu dozymetrycznego, wyposażonego w polską aparatu-

### Literatura

- [1] A. Libura: Słsiema cifrowych izmierenij temperatury wnutrireaktornogo kontrola. Referat wygłoszony na międzynarodowej konferencji n. t. "Sterowanie reaktorów i elektrowni atomowych". Warszawa, gruzdzien 1973.
- [2] A. Libura: Sprawozdania z pracy pt. "Model T-8/1 podsystemu INCORMER-T. Opracowanie wewnętrzne Mera-PIAP, nr 1291, styczeń 1975.
- [3] S. Chwaszczewski: Komputerowy System Pomiarów Wewnątrzrdzeniowych Reaktorów WWER-440 i WWER-1000, Maszynopis referatu na konferencję nt. Automatyzacja Elektrowni Atomowych /przewidzianą na styczeń 1976/.
- [4] S. Chwaszczewski: Oprogramowanie systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktorów WWER-440 i WWER-1000. Referat na Konferencję nt. Automatyzacja Elektrowni Atomowych.
- [5] S. Chwaszczewski; K. Jabłoński, A. Libura, L. Strzałkowski: Sprawozdanie z rozmów ze specjalistami Instytutu Energii Atomowej w Moskwie oraz Elektrowni Atomowej Nowo-Woroneż, 2-10 października 1974.
- [6] A. Libura i M. Nadachowski: Przetworniki Analogowo-Cyfrowe. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.

rę dozymetryczną lub wykonanie tego układu według projektu dostawcy EJ z dużym udziałem polskiej aparatury pomiarowej. Podjęcie decyzji w tej sprawie wymaga przeprowadzenia analizy ekonomicznej i technicznej na podstawie opracowanej koncepcji, planów rozwoju energetyki jądrowej w Polsce, planów kooperacji w ramach RWPG oraz planów przemysłu aparatury jądrowej, jak również uzgodnień z dostawcą EJ.

Dozymetryczny układ pomiarowy elektrowni jądrowej /EJ/ zawiera: aparaturę, oprzyrządowanie, układy i urządzenia przeznaczone do gromadzenia i obróbki informacji o stanie ochrony radiologicznej w obiekcie. Służą one do długotrwałego utrzymania właściwych warunków pracy elektrowni, zgodnie z ustalonymi parametrami ochrony oraz do kontroli usuwania do otoczenia i gromadzenia odpadów promieniotwórczych, a także poziomów narażenia personelu.

Prognozowanie zagadnień ochrony radiologicznej EJ na podstawie informacji uzyskanych z dozymetrycznego układu pomiarowego pozwala na zwiększenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, zapewnienie maksymalnego bezpieczeństwa personelu oraz ogranicza możliwość skażenia otaczającego środowiska.

## 2. Założenia koncepcji układu i rozmieszczenia punktów pomiarowych

### 2.1. Charakterystyka źródeł promieniowania

Pierwotnym źródłem promieniowania w EJ jest rdzeń reaktora. Wszystkie inne źródła promieniowania są źródłami wtórnymi, powstały w wyniku pracy reaktora.

Jakość elementów paliwowych będzie w zasadniczy sposób rzutować na wielkość występujących wtórnych źródeł promieniowania. Z tego względu przytoczone poniżej liczby należy traktować jako szacunkowe, wskazujące jedynie rząd wielkości.

W czasie normalnej eksploatacji EJ, rdzeń reaktora jako źródło promieniowania mieszanego  $\alpha, \beta, \gamma$  nie stanowi praktycznie problemu z punktu widzenia narażenia personelu, ze względu na: stosowany układ osłon oraz niedostępność hali reaktora,

Pola promieniowania gamma występujące przy przeładunku paliwa wypalonego z rdzenia reaktora oraz wtórne źródła promieniowania decydować będą o poziomie narażenia personelu.

Narażenie personelu w czasie normalnej eksploatacji jest stosunkowo niewielkie - zasadniczy udział mają prace remontowe oraz załadowczo-rozładowcze prowadzone w EJ.

Narażenie personelu może być:

- zewnętrzne - w wyniku występowania pól głównie promieniowania gamma, częściowo beta i /w pomijalnym stopniu/ neutronów;
- wewnętrzne - związane jest z powstaniem skażeń powierzchniowych i przestrzennych /gazami i pyłami promieniotwórczymi/.

Wielkość występujących źródeł promieniowania może być zwiększona w określonych układach technologicznych nawet o wiele rzędów wielkości w przypadku nieprawidłowości technologicznych prowadzących do stanów awaryjnych.

#### 2.1.1. Pierwszy obieg wodny

Zasadniczymi elementami pierwszego obiegu chłodzenia są: reaktor, wytwornice pary, główne pompy cyrkulacyjne, układ stabilizacji

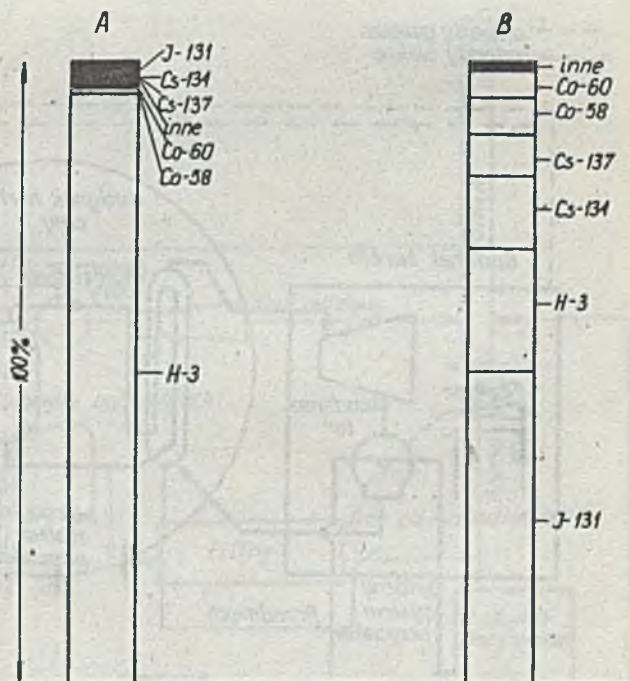
ciśnienia i układ oczyszczania wody. Izotopy promieniotwórcze pojawiają się w I obiegu jako:

- a/ produkty rozszczepienia  $^{235}\text{U}$
- b/ produkty aktywacji wody, jej zanieczyszczeń i materiałów konstrukcyjnych.

Produkty rozszczepienia  $^{235}\text{U}$  pochodzą z trzech źródeł:

- Nieszczelności gazowych /spod koszulki elementów paliwowych poprzez mikrodefekty przedostają się gazowe i lotne izotopy/. Przyjmuje się, że elementy paliwowe z "gazową nieszczelnością" stanowią przy końcu kafłan paliwowej ok. 1% całkowitej ilości paliwa;
- Nieszczelności odkrytych /znaczące nieszczelności, przy których ma miejsce bezpośredni kontakt chłodziwa z paliwem i do obiegu wydostają się wszystkie produkty rozszczepienia/. Elementy paliwowe z nieszczelnością odkrytą, wg aktualnie przyjmowanych założeń, stanowią ok. 0,1% całkowitej ilości paliwa;
- Zanieczyszczeń powierzchniowych elementów paliwowych  $^{235}\text{U}$ . Przyjmowany standard dla paliwa EJ typu WWER wynosi aktualnie ok.  $10^{-9}\text{g/cm}^2$ .

Produkty aktywacji powstają w silnym polu neutronowym obszarze rdzenia reaktora. W pierwszym obiegu pojawiają się one głównie ze względu na korozję i erozję występującą w obszarze strefy aktywnej. Formą ich wystę-



Rys. 1. Względne aktywności i względne radiotoksyczności izotopów promieniotwórczych występujące w ciekłych odpadach z reaktora PWR. A/ % aktywności izotopów promieniotwórczych, B/ % radiotoksyczności izotopów promieniotwórczych

Uwaga: Analizy próbki dokonano po czasie ok. 1 tygodnia od momentu pobrania

powania są gazy, związki rozpuszczalne i nierozpuszczalne w wodzie, a także koloidy.

Aktywność ta, z wyłączeniem tzw. aktywności tlenowej  $^{16}\text{N}$  w wodzie pierwszego obiegu, stanowi aktualnie dla warunków EJ WWR około 1% aktywności związanej z obecnością produktów rozszczepienia. Sumaryczna aktywność względna tych produktów wynosi maksymalnie ok.  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{Ci/kg}$  i wywołana jest głównie zaaktywowaniem chromu, żelaza, manganu, kobaltu, cynku i niobu. Aktywność  $^{16}\text{N}$  na wyjściu z rdzenia wg szacunkowych obliczeń wykonanych dla warunków EJ typu WWR wynosi ok. 0,1 Ci/kg.

Względne stężenia najbardziej istotnych radioizotopów, mogących stanowić zasadnicze narażenie personelu przy pracach remontowych, z uwzględnieniem ich radiotoksyczności, podano na rys. 1.

W tabeli 1 podano rodzaje i stężenia nuklidów promieniotwórczych występujących w wodzie I obiegu III bloku Nowoworoneżskiej EJ. Próbkę analizowaną była w kilka godzin po pobraniu i dotyczyła wstępnego okresu kampanii paliwowej.

Występujące moce dawki pochłoniętej w pomieszczeniach pierwszego obiegu w czasie pracy EJ są w granicach od kilku do ok. 300 rad/godz.

### 2.1.2. Drugi obieg parowo-wodny

Istotniejszymi elementami drugiego obiegu są: wytwornica pary, turbiny, skraplacze,

odgazowywacze, filtry i pompy. W wypadku nieszczelności w wytwornicach pary izotopy promieniotwórcze mogą przeniknąć z I do II obiegu. Wówczas pewna ilość pary upuszczana z eżektorów do otoczenia będzie skażona izotopami promieniotwórczymi.

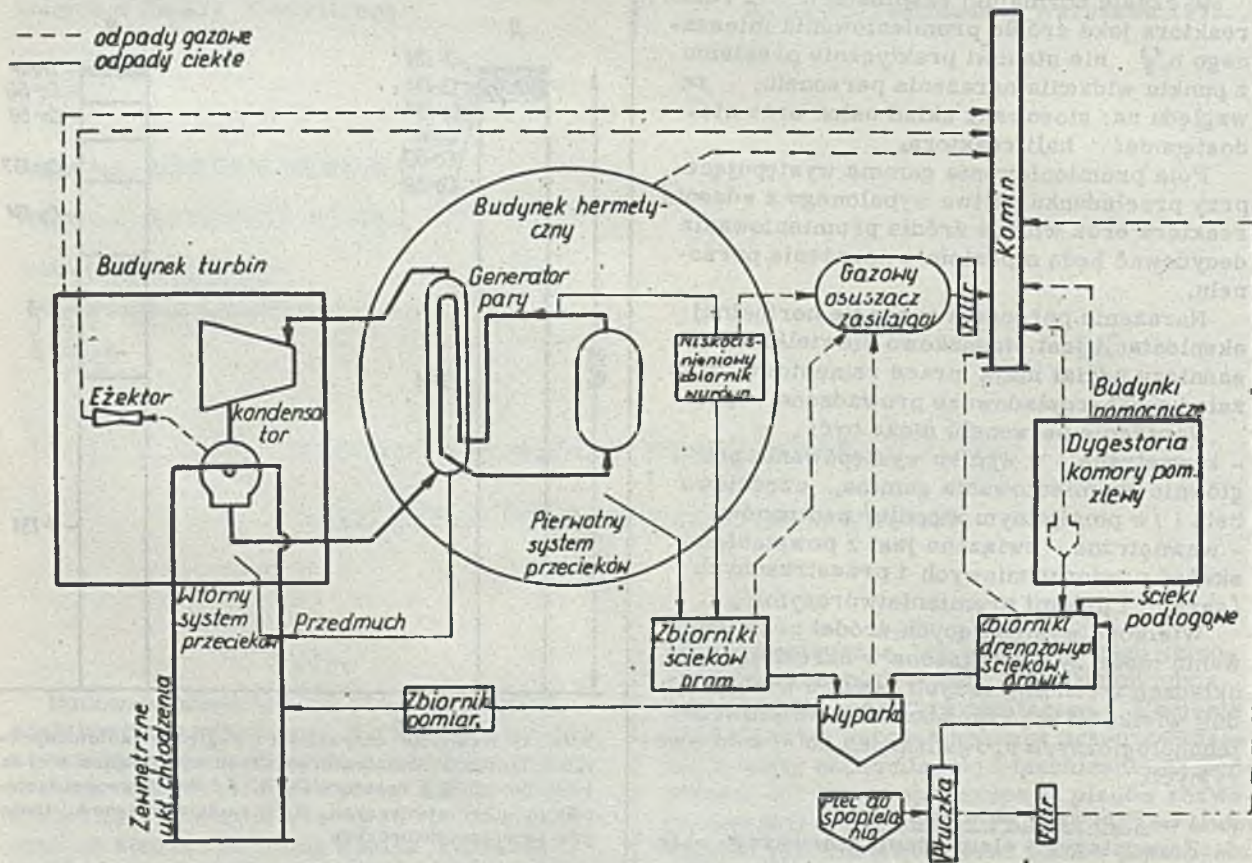
Skład izotopów jest analogiczny, jak w pierwszym obiegu wodnym. Z dotychczasowej praktyki pracy tego typu EJ wynika, że eksploatacja była kontynuowana przy poziomie skażeń obiegu rzędu  $10^{-6} \text{Ci/kg}$ . Odpowiadało to poziomowi mocy dawki pochłoniętej na powierzchni turbiny, po długim okresie eksploatacji, ok. 1 mrad/godz.

### 2.1.3. Ciekłe odpady promieniotwórcze

Schemat możliwych dróg przedostawania się odpadów promieniotwórczych do otoczenia podano na rys. 2.

Układ ciekłych odpadów promieniotwórczych dzieli się najczęściej na: układ zbierania przecieków /zawierający wodór/ i układ o otwartej wentylacji.

W niskociśnieniowym zbiorniku wyrównawczym /element układu zbierania przecieków/ zbierane są przecieki z I obiegu oraz układu regulacji stężenia boru i z układu poboru próbek. Po zebraniu dostatecznej ilości ścieków następuje obróbka na wyparce. Destylat otrzymywany z wyparki zostaje wpuszczony do obiegu wody chłodzącej, a sucha pozostałość usuwana jest w formie stałych odpadów promieniotwórczych.



Rys. 2. Schemat ruchu odpadów promieniotwórczych w EJ

Tabela 1

Data	Moc elektr. MWe	Stężenie izotopów Ci/kg					
		A	$^{131}\text{J}$	$^{132}\text{J}$	$^{133}\text{J}$	$^{135}\text{J}$	$^{133}\text{Xe}$
21.07	410	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
		$^{135}\text{Xe}$	$^{88}\text{Kr}$ $^{85}\text{Kr}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{138}\text{Cs}$	$^{18}\text{F}$	$^{24}\text{Na}$
		$5,9 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$ $8 \cdot 10^{-8}$	$10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$
		$^{42}\text{K}$					
		$5 \cdot 10^{-5}$					

W układzie otwartej kanalizacji na wyparkach obrabiana jest również woda uwalniana z I obiegu podczas rozładunku paliwa, z basenu paliwa wypalonego, z płuczek układu spopielenia, z układu chłodzenia osłony termicznej, z układu dekontaminacji i z zespołu zbiorników ścieków grawitacyjnych.

Rodzaj izotopów promieniotwórczych gromadzonych w tych układach, jak i ich aktywności uwarunkowane są głównie rodzajem stosowanego paliwa i przyjętej technologii.

Po obróbce ciekłych odpadów promieniotwórczych pewna ich ilość trafia do wód otoczenia. Roczne uwolnienia szacowane są na:  
 - kilkadziesiąt do kilkaset mCi - aktywności globalnej izotopów beta-gamma promieniotwórczych,  
 - kilkaset Ci - tryt /HTO/.

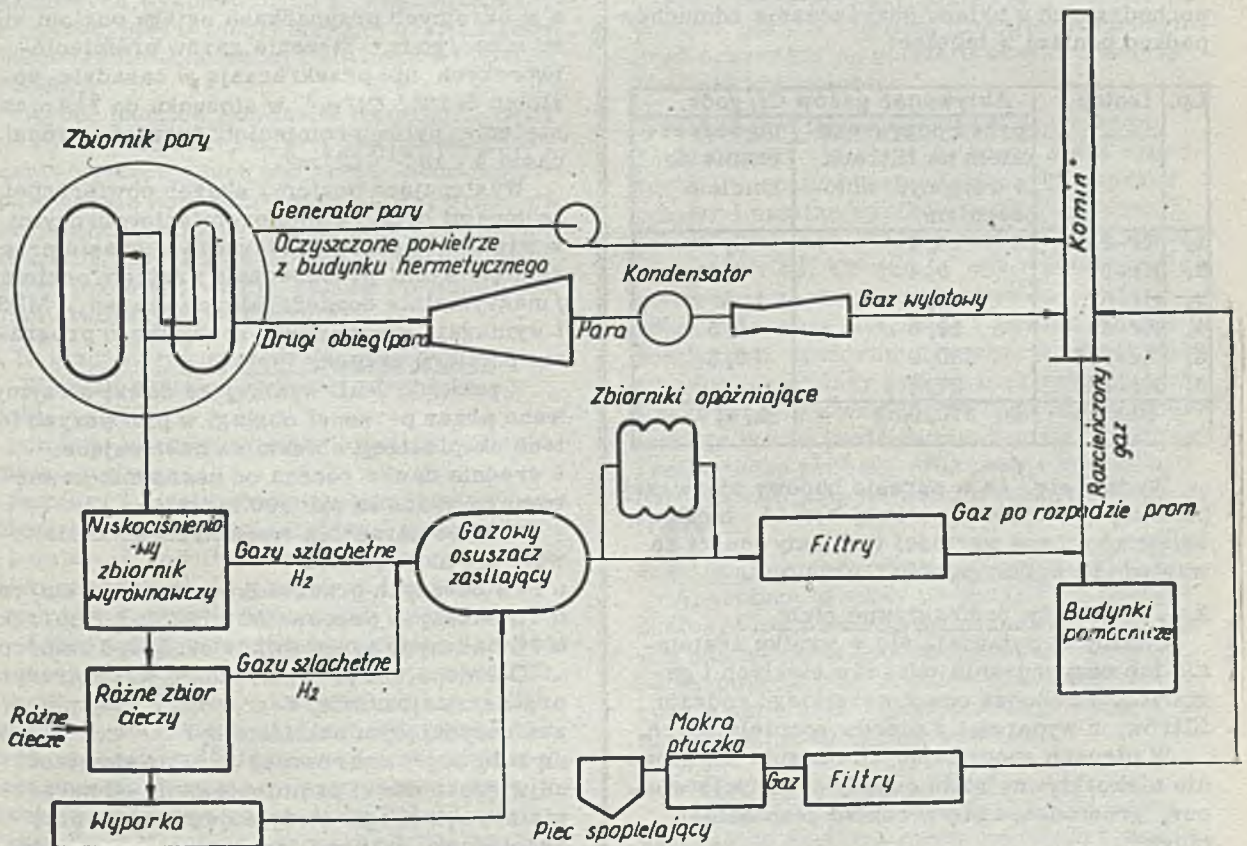
#### 2.1.4. Odpady gazowe

Schemat przejścia dopadów gazowych do otoczenia ilustruje rys. 3.

Zróżnicami gazowych odpadów promieniotwórczych są:

- system ciśnieniowy układu ciekłych odpadów promieniotwórczych,
- niskociśnieniowy zbiornik wyrównawczy,
- wyparki,
- różne zbiorniki cieczy,
- eżektor i dławice uszczelniające kondensatora,
- wentylacja budynku szczelnego,
- laboratorium analizy wody,
- układ spopielenia.

Gazy z systemu ciśnieniowego układu ciekłych odpadów promieniotwórczych, z niskociśnieniowego zbiornika wyrównawczego i z wy-



Rys. 3. Schemat ruchu gazowych odpadów promieniotwórczych w EJ

parek zbierane są w ciśnieniowym osuszaczu zasilającym. Występuje tam ciśnienie kilku atmosfer. Następnie gazy te przetrzymywane są w zbiornikach opóźniających, gdzie wskutek rozpadu promieniotwórczego aktywność gazów maleje. Atmosfera gazu w tych zbiornikach jest obojętna w stosunku do wodoru /azot/. Niewielka ilość gazu z tych zbiorników uwalniana jest do komina poprzez układ filtrów.

Do komina odprowadzane są również gazy z następujących urządzeń: z eżektora głównego kondensatora znajdującego się w II obiegu i dławic uszczelniających kondensatora, zbiorników ścieków II obiegu, wyparek na których prowadzi się przerób ścieków ze zbiorników grawitacyjnej kanalizacji drenażowej i pieców spopielających. W tych ostatnich gazy powstają przy spalaniu odpadów stałych i przechodzą przez płuczkę wodną i układ filtrów.

Według danych dostawcy, ilość uwalnianych gazów promieniotwórczych przez komin nie będzie przekraczać poziomu 430 Ci/dobę, zaś pyłów promieniotwórczych około 0,1 Ci/dobę.

Jeśli nie ma wycieków aktywnego chłodziwa do pomieszczeń szczelnych, to aktywność usuwanego powietrza /z układów wentylacji technologicznej/ określona jest przez: aktywność powietrza z objętości szybu reaktora /ok. 3 Ci/dobę głównie gazowych produktów rozszczepienia Xe i Kr/ oraz zdmuchy technologiczne zawierające czynnik aktywny.

Pości kierowanych do komina aktywności pochodzących z układu oczyszczania zdmuchów podana poniżej w tabelce:

Lp.	Izotop	Aktywność gazów Ci/godz.	
		przed oczyszczeniem na filtrach i wstępnym chłodzeniem	po oczyszczeniu do komina
1.	Kr-85m	4,4	0,5
2.	Kr-85	0,4	0,4
3.	Kr-87	8,2	-
4.	Kr-88	12,0	0,5
5.	Xe-133	330,0	3,3
6.	Xe-135	27,0	-
Razem		ok. 370,0	ok. 4,7

Wydaje się, że w okresie budowy pierwszej polskiej elektrowni jądrowej będzie można osiągnąć niższe wartości tych aktywności ze względu na ogólny postęp technologii.

#### 2.1.5. Odpady radioaktywne stałe

Odpady te pojawiają się w wyniku zestalania lub oczyszczania odpadów ciekłych i gazowych. Pochodzą one z wszelkiego rodzaju filtrów, z wyparek i z pieców spopielających.

W piecach spopielających obrabia się głównie niskoaktywne stałe odpady promieniotwórcze, gromadzące się w czasie eksploatacji obiektu.

Tkaniny filtracyjne, jonity, masa powyparowana i popioły zestalane i usuwane są w formie bloków poza teren elektrowni. Osiągają one znaczne aktywności zwłaszcza przy niesprawnościach technologicznych. Aktywności właściwe mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach.

#### 2.1.6. Źródła zagrożenia w pomieszczeniach technologicznych EJ

Przez szereg pomieszczeń technologicznych dostępnych dla personelu obsługi przechodzą ciągi ruchu wypalonego paliwa jądrowego, źródła i odpadów promieniotwórczych, które powodują występowanie znacznych i rozległych pól promieniowania gamma i beta, mogących wpływać na zewnętrzne narażenie personelu.

W trakcie eksploatacji EJ możliwe jest pojawienie się nieszczelności urządzeń technologicznych zapełnionych czynnikami radioaktywnymi i w wyniku tego - wydalania produktów radioaktywnych do przestrzeni pomieszczeń technologicznych o ograniczonym ruchu, jak i ogólnie dostępnych dla ludzi. Sytuacja taka prowadzi do powstania skażeń powierzchni oraz powietrza gazami i pyłami promieniotwórczymi.

Z praktyki obiektów EJ typu WWER wynika, że w pomieszczeniach technologicznych dostępnych dla personelu obsługi poziom promieniowania gamma wynosi ok. 0,1 mrad/godz., w ok. 2% pomieszczeń dochodzi do 0,5 mrad/godz. a w skrajnych przypadkach osiąga poziom kilku mrad/godz. Stężenia gazów promieniotwórczych nie przekraczają w zasadzie poziomu  $5 \cdot 10^{-7}$  Ci/m<sup>3</sup> w stosunku do <sup>41</sup>Ar, zaś stężenie pyłów promieniotwórczych wynosi około  $5 \cdot 10^{-10}$  Ci/m<sup>3</sup>.

Występujące poziomy skażeń powierzchni izotopami beta-gamma promieniotwórczymi w wielu miejscach /zwłaszcza w czasie prac remontowych/ przekraczają przyjęte poziomy /maksymalnie dopuszczalnych skażeń - MDS/ i wymagają opracowania specjalnego programu pomiaru skażeń.

Z praktyki NRD wynika, że dawki otrzymywane przez personel obsługi w pierwszych latach eksploatacji obiektu są następujące:

- średnia dawka roczna od narażenia zewnętrznego wynosiła ok. 900 mrem;
- dawki od narażenia wewnętrznego kształtowały się na poziomie:
  - u 92% badanych pracowników ok. 1,5 rem/rok,
  - u 7% badanych pracowników ok. 1-5 rem/rok,
  - u 1% badanych pracowników ok. 3-7,5 rem/rok.

Oceniono, że przy narażeniu wewnętrznym organem najbardziej zagrożonym były płuca, zaś decydującym nuklidem był <sup>60</sup>Co. Znaczną rolę odgrywał również <sup>131</sup>I. Natomiast największe dawki promieniowania od narażenia zewnętrznego otrzymuje obsługa przy przeładunku paliwa i pracach remontowych.

### 3. Funkcje i skład dozymetrycznego układu pomiarowego EJ

Dozymetryczny układ pomiarowy wypełnia następujące funkcje:

- kontrola stanu warunków radiacyjno-technologicznych w obiegach wodnych,
- kontrola szczelności instalacji zawierających substancje promieniotwórcze,
- kontrola pól promieniowania i skażeń promieniotwórczych,
- kontrola indywidualnego narażenia personelu,
- kontrola odpadów promieniotwórczych usuwanych do okolicy.

Układ ten pozwala na ocenę stanu zagrożenia radiacyjnego i narażenia personelu zarówno w czasie normalnej pracy EJ, jak również na wykrywanie i identyfikację nieprawidłowości technologicznych, mogących prowadzić do stanów awaryjnych.

Dozymetryczny układ pomiarowy składa się z następujących elementów:

- stacjonarnego systemu dozymetrycznego,
- przenośnej aparatury pomiarowej,
- laboratoryjnej aparatury pomiarowej,
- aparatury kontroli indywidualnego narażenia,
- systemu kontroli okolicy.

Zespoły detekcyjne stacjonarnego systemu dozymetrycznego dostarczają w sposób ciągły informacji z wydzielonych przestrzeni w obiekcie i wokół obiektu, w których mogą występować podwyższone poziomy promieniowania. Dalsze informacje uzyskuje się z pomiarów okresowych wykonywanych za pomocą aparatury operacyjnej i laboratoryjnej oraz na podstawie radiotechnicznej i chemicznej analizy próbek.

Wybór punktów pomiarów i kontroli oraz ich rozmieszczenie, oparty jest na analizie i ocenie występujących poziomów promieniowania w czasie normalnej eksploatacji oraz na założeniach konstrukcyjnych i wymaganiach technologicznych związanych z ruchem ludzi, źródeł promieniowania, paliwa i odpadów promieniotwórczych w obiekcie.

#### 3.1. Stacjonarny system dozymetryczny

W skład systemu wchodzi następujące bloki:

- pomiaru lub monitorowania pola promieniowania gamma,
- pomiaru i monitorowania stężeń gazów promieniotwórczych /w powietrzu i gazach/,
- pomiaru i monitorowania stężeń pyłów promieniotwórczych /w powietrzu i gazach/,
- pomiaru i monitorowania aktywności cieczy.

Aparatura pomiarowa tego systemu umieszczona jest w wydzielonej sekcji sterowni EJ, zwanej dalej Centralą Dozymetryczną /CD/ oraz w wydzielonych sekcjach sterowni lokalnych, związanych z konkretnym rejonem technologicznym /np. sterowania układu przygotowania wody/ nazywanych dalej Rejonowymi Centralami Dozymetrycznymi /RCD/. Całość informacji ze stacjonarnego systemu dozymetrycznego przekazywana jest do CD, a infor-

macji z wybranych torów pomiarowych dodatkowo do pulpitu operatora w sterowni EJ. Przekroczenie założonych progów sygnalizowane jest zależnie od rodzaju pomiaru w punkcie pomiarowym, RCD względnie w CD oraz na pulpicie operatora w sterowni EJ. System współpracuje z maszyną cyfrową.

Aparatura stacjonarnego systemu dozymetrycznego spełnia następujące wymagania:

- zakres pomiarowy zależny od punktu pomiarowego, obejmujący 4 - 6 dekad, odczyt cyfrowy;
- nieprzeciążalność do 100-krotnego przekroczenia zakresu maksymalnego;
- temperatura otoczenia 5 - 50°C. pojedyncze zespoły detekcyjne do 300°C,
- wilgotność względna 80%, niektóre zespoły detekcyjne i aparatura do 100%,
- ciśnienie - normalne niektóre aparaty umieszczone w budynku szczelnym wytrzymałe na ciśnienie testowe /niektóre zespoły detekcyjne do 70 at./.

#### 3.2. Przenośna aparatura pomiarowa /operacyjna/

Aparatura ta służy do okresowej oceny stanu zagrożenia radiologicznego w miejscu pomiaru. Aparatura operacyjna /noszona i przenośna/ do pomiaru zagrożenia zewnętrznego /promieniowanie gamma i neutronowe/ oraz do pomiaru skażeń powierzchni jest typową aparaturą używaną do pomiarów zagrożenia radiologicznego. Należą tu także operacyjne przyrządy do pomiaru skażeń powietrza gazami i pyłami promieniotwórczymi oraz przyrządy do pomiaru skażeń odzieży /bramki kontrolne/.

#### 3.3. Laboratoryjna aparatura pomiarowa

Aparatura ta służy do oceny stanu zagrożenia i warunków technologicznych poprzez pomiar i analizę wyników pomiaru próbek pobieranych z obiektów i pomieszczeń technologicznych EJ. Obejmuje ona typowe radiometryczne zestawy pomiarowe do pomiaru promieniowania alfa, beta i gamma łącznie z pomiarami spektrometrycznymi. Aparatura umożliwia pomiary próbek ciekłych, stałych i gazowych. Ze względu na dużą liczbę próbek istnieje konieczność automatyzacji pomiarów /zmiennicze próbek, drukowanie wyników, obróbka wyników we współpracy z maszyną cyfrową/.

#### 3.4. Aparatura kontroli indywidualnej

Aparatura ta służy do określenia indywidualnego narażenia pracowników EJ. Umożliwia ona zarówno pomiar dawek otrzymanych od ekspozycji, jak również dawek pochodzących z narażenia wewnętrznego. Stosuje się też specjalne detektory awaryjne.

#### 3.5. System kontroli okolicy

System ten służy do wykrywania i oceny zagrożenia okolicy, spowodowanego pracą EJ. W jego skład wchodzi: przyrządy do pomiaru mocy dawki promieniowania i poziomu skażeń

promieniotwórczych w terenie oraz sprzęt do pobierania prób i aparatura pomiarowa do oznaczania ich aktywności.

### 3.6. Współpraca układu dozymetrycznego z systemem Centralnej Rejestracji i Przetwarzania Danych /CRPD/

Z systemem CRPD współpracuje tylko stacjonarny system dozymetryczny. Realizowane są następujące funkcje:

- uśrednianie wartości pomiarowych wybranych torów na dłuższe okresy czasu;
- wyznaczanie tendencji zmian wskazań wybranych torów pomiarowych;
- badanie przekroczeń w stosunku do ustalonych poziomów;
- transmisja wartości pomiarowych do pamięci;
- prezentacja danych za pomocą monitora ekranowego, drukarki wierszowej lub rejestratora x-y;
- wykonywanie niektórych obliczeń, np. określanie całkowitej aktywności odpadów usuwanych przez komin w określonym czasie;
- obróbka widm ze spektrometrycznych torów pomiarowych.

Szczegóły dotyczące współpracy układu

dozymetrycznego z systemem CRPD nie wchodzi w zakres niniejszego opracowania.

### 3.7. Stany nieprawidłowości technologicznych

W wypadku zaistnienia nieprawidłowości technologicznej układ dozymetryczny umożliwia śledzenie jej przebiegu oraz ocenę narażenia personelu aż do konieczności organizowania ewakuacji włącznie.

Praca układu dozymetrycznego w warunkach awaryjnych oraz ewentualne przeniesienie wskazań niektórych torów pomiarowych poza budynek EJ winny być ustalone w wyniku analizy stanów awaryjnych w raporcie bezpieczeństwa. Pociągnie to za sobą niewielkie zmiany w proponowanym układzie dozymetrycznym.

### 4. Rozwiązanie techniczne dozymetrycznego układu pomiarowego

#### 4.1. Stacjonarny system dozymetryczny

Do stacjonarnego systemu dozymetrycznego zalicza się aparaturę dozymetryczną zainstalowaną i połączoną liniami informacyjnymi i sterującymi z Centralą Dozymetryczną /CD/ Skład aparatury stacjonarnego systemu dozymetrycznego podano w poniższej tabeli:

Lp.	Rodzaj kontroli	Zakres pomiarowy	Liczba punktów pomiarowych
1.	Kontrola skażeń radioaktywnych w I obiegu	ciecz $10^{-3}$ - $10^1$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ pyły $10^{-10}$ - $10^{-6}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ gazy $10^{-6}$ - $10^{-2}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	20
2.	Kontrola skażeń radioaktywnych w II obiegu	ciecz $10^{-5}$ - $10^{-1}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ pyły $10^{-10}$ - $10^{-6}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ gazy $10^{-6}$ - $10^{-2}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	20
3.	Kontrola skażeń powietrza w układach wentylacyjnych	pyły $10^{-10}$ - $10^{-6}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ gazy $10^{-6}$ - $10^{-2}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	45
4.	Kontrola skażeń powietrza usuwanego przez komin do otoczenia	pyły $10^{-10}$ - $10^{-5}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ gazy $10^{-6}$ - $10^{-1}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ jody $10^{-10}$ - $10^{-5}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ awaryjny $10^2$ - $10^7$ mR/h	4
5.	Kontrola skażeń odpadów ciekłych	układ kanalizacji $10^{-5}$ - $10^0$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ zbiorniki ścieków czyst. $10^{-7}$ - $10^{-2}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ zbiorniki ścieków niskoaktywnych $10^{-6}$ - $10^{-1}$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ zbiorniki ścieków średnioaktywnych $10^{-5}$ - $10^0$ $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	20
6.	Kontrola pól promieniowania gamma /pomiar/	$10^0$ - $10^5$ mR/h	45
7.	Kontrola pól promieniowania gamma /sygnalizacja/	próg $0,5$ - $500$ mR/h	35



Rejonizacja systemu dozymetrycznego jest następująca:

- detektory pomiarowe - pomieszczenia kontrolowane EJ,
- detektory systemu kontroli gazów i pyłów promieniotwórczych/instalacje i układ pompy - pomieszczenie dozymetryczne /PD/,
- szafy z aparaturą pomiarową - rejonowe centrale dozymetryczne /RCD/,
- centralna aparatura dozymetryczna - centrala dozymetryczna /CD/,
- układy i obwody prezentacji danych i sygnalizacji przekroczenia progów niektórych torów pomiarowych - pulpit operatora w sterowni EJ.

System składa się z następujących zespołów:

- tory pomiarowe,
- tory sterujące,
- instalacja pomiarowa gazów i pyłów promieniotwórczych,
- tory rejestracji i prezentacji danych,
- obwody sygnalizacji.

#### 4.1.1. Tory pomiarowe

W skład toru pomiarowego wchodzi: zestaw detekcyjny, miernik zbierający informacje /zawierający niekiedy układ sygnalizacji progowej/ i magistrale połączeniowe.

Zespoły detekcyjne promieniowania jonizującego lokalizowane są w zasadzie w miejscu kontrolowanym. Wyjątek stanowią zespoły detekcyjne kontroli gazów i pyłów promieniotwórczych w powietrzu, do których czynnik mierzony prowadzony jest specjalną instalacją rurową.

W zespołach detekcyjnych promieniowania jonizującego wyróżniamy następujące detektory:

- liczniki GM - niektóre w specjalnym wykonaniu /ciśnienie i warunki termiczne/,
- liczniki scyntylicyjne - /NaJ /Tl/ - niektóre sondy w wykonaniu spektrometrycznym i specjalnym /warunki termiczne/,
- komory jonizacyjne i komory jonizacyjne przepływowe.

Z uwagi na czułość pomiaru, w systemie przewidziano zastosowanie w niektórych torach zestawów detektorów pozwalających na kompensację tła /podwójny detektor/. Specjalne zestawy detekcyjne zawierają ponadto osłony bądź kolimatory zewnętrznego pola promieniowania albo układy chłodzenia sondy. Zestawy wyposażone są w źródła kontrolne, służące do sprawdzenia działania toru pomiarowego.

W skład zestawu detekcyjnego wchodzi również układ elektroniczny umożliwiający przesyłanie sygnału z detektora do miernika.

Miernikami zbierającymi informacje z zestawów detekcyjnych są: integrator, dawkomierz, elektrometr i sygnalizator dozymetryczny.

Integrator jest przyrządem służącym do pomiaru średniej części impulsów przychodzących z zestawów detekcyjnych dostarczających informacji w postaci impulsowej/liczniki GM, detektory scyntylicyjne/. Elektro-

metr służy do pomiaru natężenia prądu z detektorów prądowych /komory jonizacyjne/. Sygnalizator dozymetryczny jest przyrządem służącym do sygnalizacji przekroczenia zadanego progu mocy dawki ekspozycyjnej.

Magistrale połączeniowe podzielone są na pomiarowe i informacyjne.

Magistrale pomiarowe zawierają zespoły kabli łączących zestaw detekcyjny złożony z mierników. Magistrale informacyjne służą do przekazywania danych z poszczególnych kanałów pomiarowych do centrali dozymetrycznej /CD/.

#### 4.1.2. Tory sterujące

Tory sterujące dzielą się na: tory sterujące zaworami elektromagnetycznymi i tory sterujące układami kontroli wewnętrznej mierników i źródłami kontrolnymi.

Wszystkie pomiary gazów i pyłów promieniotwórczych odbywają się przy użyciu dodatkowej instalacji rurowej, w której zainstalowane są zawory zdalnie zamykane i otwierane. Rozkazy kierowane są z CD lub z bloku sterującego przy maszynie cyfrowej. W pompowniach dozymetrycznych znajdują się bloki wykonawcze. Drugi rodzaj rozkazów to otwieranie źródeł kontrolnych przy detektorach i włączanie generatorów sprawdzających część elektryczną aparatury pomiarowej. Rozkazy te kierowane są z CD lub RCD.

#### 4.1.3. Instalacja pomiarowa gazów i pyłów promieniotwórczych

Instalacja składa się z systemu rurek odprowadzających gazy i aerozole z miejsc kontrolowanych do pompowni dozymetrycznych. Drugą część tej instalacji stanowi wyjście gazów pomierzonych do wentylacji. Wszystkie kanały instalacji rurowej zaopatrzone są w zawory i pompy uruchamiane zdalnie w CD lub automatycznie przez maszynę cyfrową. W skład instalacji wchodzi też mierniki przepływu i ciśnienia wyposażone w układy sygnalizacji stanów nieprawidłowej pracy instalacji.

#### 4.1.4. Tory rejestracji i prezentacji danych

Tory służą do przekazywania i obróbki danych otrzymywanych z poszczególnych przyrządów pomiarowych systemu dozymetrycznego. Należą tutaj rejestratory, układy wprowadzenia i wyprowadzenia danych z maszyny cyfrowej, drukarka, dziurkarka oraz wielokanałowe układy prezentacji danych. Zespoły te zlokalizowane są w CD i RCD.

#### 4.1.5. Obwody sygnalizacji

Obwody te służą do sygnalizacji przekroczenia zadanego poziomu oraz do sygnalizacji niesprawności toru pomiarowego. Otrzymują one sygnały z przyrządów pomiarowych i poprzez linie przesyłowe przekazują je do tablic sygnalizacyjnych w CD i RCD, jak również do optycznych i akustycznych sygnalizatorów zewnętrznych zainstalowanych w odnośnym rejonie. W RCD sygnalizowane są: niesprawność i przekroczenie progu własnych

przrzędów, w CD - niesprawność i przekroczenie progu wszystkich torów pomiarowych, a na pulpicie operatora EJ przekroczenie progów wybranych torów. Sygnalizacja zewnętrzna wyprowadzona jest tylko z przrzędów, których wskazania są istotne ze względu na ruch ludzi w obiekcie.

#### 4.2. Przenośna aparatura pomiarowa

Aparatura ta przeznaczona jest do operacyjnych pomiarów stanu zagrożenia radiologicznego w różnych punktach obiektu. Pomiar wykonywane są zarówno przez pracowników służby dozymetrycznej, jak też przez innych pracowników eksploatacji EJ. W skład aparatury przenośnej wchodzi przrzędy pomiarowe i urządzenia, umożliwiające wykonywanie następujących pomiarów:

1/ Pomiar zagrożenia od zewnętrznego promieniowania gamma:

a/ Komorowy, noszony miernik mocy dawki o zakresie pomiarowym 1 mR/h + 10 R/h i zakresie energetycznym 20 keV + 2 MeV, ok. 5 szt.;

b/ Licznikowy noszony miernik mocy dawki o zakresie pomiarowym 0,1 mR/h + 100 R/h i zakresie energetycznym 80 keV + 2 MeV, ok. 10 szt.;

c/ Licznikowy noszony, kieszonkowy miernik mocy dawki o zakresie pomiarowym 0,1 mR/h + 1 R/h i zakresie energetycznym 80 keV + 2 MeV; ok. 10 szt.;

d/ Przenośny sygnalizator przekroczenia mocy dawki promieniowania gamma o zakresie progu 0,5 mR/h + 500 mR/h i zakresie energetycznym 80 keV + 2 MeV, ok. 10 szt.

2/ Pomiar zagrożenia od zewnętrznego promieniowania neutronowego:

a/ Miernik równoważnika mocy dawki promieniowania neutronowego o zakresie pomiarowym 1 mrem/h + 3 mrem/h i zakresie energetycznym 0,025 eV + 10 MeV, ok. 2 szt.

3/ Pomiar skażeń powierzchni:

a/ Noszony miernik skażeń powierzchni umożliwiający pomiar skażeń beta-promieniotwórczych w zakresie  $5 \cdot 10^{-5}$  +  $5 \cdot 10^{-2}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  dla energii powyżej 100 keV oraz skażeń alfa-promieniotwórczych w zakresie  $5 \cdot 10^{-6}$  +  $5 \cdot 10^{-3}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  dla energii powyżej 4 MeV, ok. 15 szt.;

b/ Przenośny miernik skażeń powierzchni o parametrach, jak w p. a/, ok. 20 szt.;

c/ Noszony miernik skażeń powierzchni trytem o progu wykrywalności  $10^{-4}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ , ok. 3 szt.;

d/ Stacjonarne urządzenie kontroli skażeń rąk, obuwia i odzieży /"bramka kontrolna"/ o progu wykrywalności skażeń beta-promieniotwórczych  $10^{-4}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ , ok. 4 szt.

4/ Pomiar skażeń powietrza aerozolami promieniotwórczymi:

a/ Przenośny miernik skażeń powietrza aerozolami alfa i beta promieniotwórczymi o progu wykrywalności dla izotopów alfa-promieniotwórczych  $10^{-8}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  i beta-promieniotwórczych  $10^{-7}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  przy czasie pomiaru poniżej 1 godz., 10 szt.;

b/ Przenośna pompka aerozoli do zasysania aerozoli na filtrze o przepływie powietrza ok.  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , ok. 10 szt.

5/ Pomiar skażeń powietrza gazami promieniotwórczymi:

a/ Przenośny miernik skażeń powietrza gazami alfa, beta promieniotwórczymi, przeznaczony do pracy w tle promieniowania gamma o progu wykrywalności dla trytu  $10^{-6}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ , ok. 3 szt.

#### 4.3. Aparatura laboratoryjna

Aparatura ta stanowi wyposażenie laboratorium radiometrycznego. Wykonuje się tu pomiary aktywności różnych próbek jak np. wymazy, filtry aerozoli, wody oraz określa zawartość poszczególnych izotopów metodą spektrometryczną. Niektóre próbki muszą być poddane uprzednio obróbce chemicznej. Aparatura laboratoryjna, niezbędna dla celów ochrony przed promieniowaniem może być wykorzystywana również dla innych pomiarów radiometrycznych i wchodzić w skład laboratorium radiometrycznego EJ.

Należą tu następujące zestawy pomiarowe:

- Zestaw do pomiaru promieniowania alfa lub beta próbek stałych - 3 kpl.,

- Zestaw do pomiaru promieniowania beta filtrów aerozoli, 3 kpl.,

- Zestaw spektrometryczny promieniowania gamma; scyntylacyjny - 2 kpl.,

- Zestaw spektrometryczny promieniowania gamma z detektorem półprzewodnikowym - 1 kpl.,

- Zestaw do pomiaru niskoenergetycznych emiterów beta /tryt/.

#### 4.4. Aparatura kontroli indywidualnej

Aparatura wchodząca w skład tej grupy służy do oceny dawek otrzymanych przez personel EJ zarówno od napromieniowania zewnętrznego, jak i skażeń wewnętrznych ciała.

Napromieniowanie zewnętrzne:

- Kasety fotometryczne umożliwiające pomiar dawek promieniowania gamma w zakresie od 50 mR + 1 kR, w zakresie energii 25 keV + 3 MeV;

- Dawkomierze specjalne dawki pochłoniętej promieniowania beta na ręce. Zakres pomiarowy  $0,1 + 10^3$  rad;

- Dawkomierze kieszonkowe z odczytem bezpośrednim dla promieniowania gamma, o zakresach: pomiarowym do 200 mR i energetycznym 80 keV + 2 MeV oraz pomiarowym do 50 R i energetycznym 80 keV + 2 MeV;

- Kieszonkowy sygnalizator przekroczenia dawki promieniowania gamma. Zakres pomiarowy 30 mR, 100 mR, 3 R.

Skażenia wewnętrzne!

- Zestaw do pomiaru zawartości jodów w tarzycy o progu wykrywalności ok. 0,1 maksymalnej zawartości dopuszczalnej, 1 kpl.;

- Prosty licznik promieniowania ciała ludzkiego o progu wykrywalności ok. 0,1 maksymalnej dopuszczalnej zawartości dla większości izotopów emitujących promieniowanie gamma, 1 kpl.

Dalsze pomiary zawartości radionuklidów w ciele ludzkim dokonywane przez pomiar aktywności konkretnych izotopów w wydalinach będą przeprowadzane za pomocą zestawów aparatury laboratoryjnej po ewentualnym przygotowaniu preparatów na drodze chemicznej.

#### 4.5. Aparatura systemu kontroli okolicy

Aparatura służąca do pomiaru mocy dawki promieniowania gamma i poziomu skażeń promieniotwórczych składa się z następujących zespołów przyrządów:

a/ Aparatura stacjonarna:

- przyrządy mierzące moc dawki promieniowania gamma w zakresie od poziomu tła do kilkuset R/h,

- przyrządy meteorologiczne mierzące kierunek i prędkość wiatru oraz temperaturę i gradient temperatury;

- przyrządy mierzące stężenie aerozoli beta promieniotwórczych w powietrzu o zakresie  $10^{-8}$  -  $10^{-5}$   $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ .

Aparatura ta będzie zlokalizowana w 2 - 3 punktach, a jej wskazania będą rejestrowane centralnie.

**mgr inż. ANDRZEJ KRZYCKI**

**mgr inż. ANDRZEJ OSTROWSKI**

**mgr inż. JADWIGA JABŁOŃSKA**

Instytut Badań Jądrowych

Świerk

## BADANIA OPRACOWANYCH W IBJ ELEMENTÓW

### SYSTEMU KONTROLI ROZRUCHU I PRZEŁADUNKU PALIWA W REAKTORACH TYPU WWER

### I WDROŻENIA TEGO SYSTEMU W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

#### 1. Wstęp

Pewna i niezawodna kontrola stanu rdzenia reaktora typu Nowoworoneżskiego w czasie przeładunku paliwa oraz w czasie rozruchu /gdy reaktor znajduje się w stanie podkrytycznym/, sprowadza się do pomiaru niskich wartości strumienia neutronowego w trudnych warunkach otoczenia, spowodowanych wysokim poziomem promieniowania gamma, wysoką temperaturą lub dużym poziomem zakłóceń elektrycznych względnie kilkoma z tych czynników naraz. Zagadnienie to nie znajduje dotychczas zadowalającego rozwiązania. Detektory, które można wprowadzić do rdzenia mogą mieć średnicę nie większą od 5,5 mm i są ze względu na małe wymiary mało czułe, detektory pracujące na zewnątrz rdzenia znajdują się w strumieniu około 1000 razy mniejszym niż występujący wewnątrz rdzenia. Wysoki poziom promieniowania gamma osiągający  $10^8$  R/h w rdzeniu i  $10^5$  R/h w kanałach poza

b/ Aparatura ruchowa - są to przyrządy podobne do przyrządów przenośnych /patrz p. 4.2./ z tym, że dalsze zakresy pomiarowe są różne, zbliżone do poziomu tła. Przyrządy te służą do pomiaru pola promieniowania gamma oraz skażeń promieniotwórczych powierzchni.

Dodatkowo przewiduje się zainstalowanie w pojeździe terenowym scyntylicyjnego zestawu pomiarowego wyposażonego w analizator, umożliwiającego pomiary spektrometryczne nuklidów emitujących promieniowanie gamma /np. zawartości  $^{131}\text{J}$  w mleku/ oraz miernik pola promieniowania gamma z rejestratorem służący do szybkiej kontroli skażeń terenu.

c/ Sprzęt do zbierania prób zawiera następujące elementy:

- detektory termo- lub fotoluminescencyjne /około 100 szt./ rozmieszczone w terenie,

- punkty zasysania powietrza na filtry /kilka sztuk/

- sprzęt do pobierania próbek wody, gleby i roślin.

Aparatura pomiarowa do oznaczania aktywności pobranych prób jest typową aparaturą laboratoryjną podaną w p. 4.3. oraz wchodzącą w skład laboratorium chemicznego.

rdzeniem oraz wysokie temperatury do  $300^{\circ}\text{C}$  w rdzeniu i do  $150^{\circ}\text{C}$  poza rdzeniem /związane między innymi z wydzielaniem w detektorze ciepła wywołanego promieniowaniem/ pozwalają na zastosowanie do detekcji strumienia neutronów tylko komór rozszczepieniowych. Jedynie w czasie pierwszego rozruchu reaktora, gdy poziom promieniowania gamma jest mały, możliwe jest zastosowanie czulszych detektorów na przykład liczników koronowych. Dlatego też w opisanym systemie pomiarowym użyto komór rozszczepieniowych, odznaczających się zdolnością do pracy zarówno w wysokich temperaturach jak i przy dużym poziomie promieniowania gamma. Utrudnieniem w zbudowaniu takiego systemu jest bardzo niski, w porównaniu z innymi detektorami, poziom sygnałów otrzymywanych z detektora, co stwarza poważne problemy przy istniejącym w elektrowni jądrowej wysokim poziomie zakłóceń elektrycznych.

Opracowany system pomiarowy zawiera zestaw detektorów, dostosowanych wymiarami i wytrzymałością do konstrukcji i warunków występujących w reaktorze typu WWER. Detektory dołączone są za pomocą odpowiednich typów kabli do aparatury obróbki sygnału, mierzącej przy niskich wartościach strumienia średnią częstość impulsów, a przy wysokich - prąd średni. Zestaw detektorów i aparatury gwarantuje kontrolę rdzenia od najniższych wartości strumienia /występujących przy przeładunku przy dużej koncentracji kwasu bornego w wodzie obiegu pierwotnego lub w rdzeniu wypełnionym świeżym paliwem przed pierwszym rozruchem/ do poziomu odpowiadającego około 10% mocy nominalnej. Detektory wewnętrzzdzeniowe wprowadzane są za pomocą dołączonych do nich kabli o izolacji mineralnej, do suchych kanałów, sięgających od pokrywy zbiornika ciśnieniowego do rdzenia reaktora. Kanały są lekko wygięte, w związku z tym detektory i kable muszą być elastyczne. Od miejsca, w którym temperatura jest dostatecznie niska, prowadzi do aparatury kabel wysokiej jakości w izolacji polietylenowej. Detektory zewnętrzzdzeniowe instalowane są przy pomiarach rozruchu w kanałach detektorów, mieszczących się w zbiorniku biologicznej osłony wodnej. Podczas przeładunku detektory umieszczone są po otwarciu zbiornika ciśnieniowego w kanałach znajdujących się na skrajnej strefy aktywnej. W związku z wysoką temperaturą występującą w miejscu umieszczenia detektorów zewnętrzzdzeniowych bierne elementy elektroniczne, współpracujące z detektorami, odsunięte są na odległość około 2 m od detektora. Aparatura, umieszczona w sterowni reaktora, dołączona jest do detektora kablami o długości rzędu 100 m.

Wymagane tłumienie sygnałów pochodzących od zakłóceń elektrycznych uzyskuje się przez zastosowanie kabli koncentrycznych o specjalnej konstrukcji, zapewniającej wysoki stopień ekranowania.

## 2. Detektory opracowane w IBJ

### 2.1. Detektory wewnętrzzdzeniowe

Opracowano różne typy miniaturowych komór wewnętrzzdzeniowych o średnicy zewnętrznej 5,5 mm pracujących w temperaturze do 300°C [1, 2, 3, 4]. Parametry komór przedstawione są w tabeli 2.1. Wszystkie opisane tu detektory są jonizacyjnymi komorami rozszczepieniowymi, w których materiałem rozszczepialnym jest uran wzbogacony w U-235, naniesiony jako twarde pokrycie na jednej z elektrod. Komory napełnione są mieszaniną gazów Ar + 2% N<sub>2</sub>. Komory pracują przy napięciu zasilania 300 V. Czas zbierania ładunku impulsu komory wynosi 10<sup>-7</sup> s.

Kable o izolacji ceramicznej /MgO/ są montowane bezpośrednio metodą spawania do komór, co pozwala na instalowanie komór w kanałach wewnątrz rdzenia reaktora, gdzie panują warunki przedstawiane w pkt. 1. Kable z izolacją ceramiczną produkcji francuskiej lub radzieckiej mają odpowiednie parametry elektryczne /rezystancja falowa i odporność na zakłócenia/, a zastosowane w nich materiały konstrukcyjne pozwalają na pracę w podwyższonych temperaturach i dużym tle promieniowania gamma.

Komora typu 9R250T/5,5 została skonstruowana specjalnie do kontroli rozruchu reaktorów energetycznych typu WWER. Przy zachowaniu wymaganej małej średnicy, nie większej od 5,5 mm, uzyskano długość komory równą 250 cm /tyle ile wynosi wysokość rdzenia reaktora/, a więc uzyskano maksymalnie dużą wypadkową czułość komory.

Komory typów 9R12T/5,5 i 1R3T/5,5-0,1 służą do pomiarów rozkładu strumienia neutronów w suchych kanałach w rdzeniu i powyżej rdzenia.

### 2.2. Wysokoczuła komora RJ-1000

Spśród komór rozszczepieniowych o dużych średnicach [3] komora typu RJ-1000 ma największą czułość na neutrony termicz-

Tabela 2.1.

Podstawowe parametry komór rozszczepieniowych

Typ komory	Wzbogacenie pokrycia w uran 235 /%/	Powierzchnia pokrycia uranowego /cm <sup>2</sup> /	Czułość na neutrony termiczne		Grubość pokrycia uranowego /mg/cm <sup>2</sup> /	Uwagi
			impulsowa /imp/s/nv/	prądowa /A/nv/		
9R250T/5,5	90	250	0,2	6x10 <sup>-14</sup>	1	wewnętrzzdzeniowe
9R100T/5,5	90	100	0,1	3x10 <sup>-14</sup>	1	wewnętrzzdzeniowe
9R12T/5,5	90	12	10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-15</sup>	1	wewnętrzzdzeniowe
1R3T/5,5-0,1	10	3	3x10 <sup>-5</sup>	8x10 <sup>-18</sup>	0,1	wewnętrzzdzeniowe
RJ-1000	90	1000	0,7	2x10 <sup>-12</sup>	1	zewnętrzzdzeniowe

ne:  $0,7 \frac{\text{imp/s}}{\text{NV}}$ . Komora ta oraz elementy przedłużające o długości do 2 m mogą pracować przy max temperaturze  $150^{\circ}\text{C}$  i max mocy dawki promieniowania  $\text{gamma } 10^5 \text{r/godz}$ . Na końcu elementów przedłużających zamontowana jest sonda transformatorowa. W ten sposób jest ona odsunięta poza strefę o wysokiej temperaturze i dużym tle promieniowania gamma. Elementy przedłużające są elastyczne, więc cały przedłużacz jest elastyczny i może być instalowany w kanale reaktora o promieniu przezięcia ok. 750 mm.

### 3. Aparatura opracowana w IBJ

Opracowano dwa typy aparatury do obróbki i pomiaru sygnałów z komór rozszczepieniowych. Linia typu ILR-5 przeznaczona jest do współpracy z detektorem zewnątrzrdzeniowym o dużej czułości i specjalnej konstrukcji, linia typu ILR-4 do współpracy z detektorami wewnątrzrdzeniowymi i z detektorem zewnątrzrdzeniowym o parametrach podobnych jak detektor współpracujący z linią ILR-5.

Przy pomiarze zewnątrzrdzeniowym, podczas którego detektor umieszcza się w jednym z suchych kanałów znajdujących się w biologicznej osłonie reaktora, zwrócono szczególną uwagę na poprawną pracę aparatury przy niskich poziomach zliczeń występujących przy wyłączonym reaktorze /współczynnik osłabienia strumienia w kanale w stosunku do rdzenia wynosi około  $10^3$ /.

W linii ILR-5 zastosowano zasadę transformatorowego odbioru sygnału impulsowego z komory oraz symetrycznego przesyłania dla zwiększenia odporności na zakłócenia. Zastosowano również przedwzmacniacz o wzmocnieniu 1000 umieszczony w tzw. pierścieniu kablowym wokół reaktora.

Dzięki odpowiedniemu systemowi zasilania detektora oraz dzięki galwanicznym połączeniom obwodów łączy transformatorowego możliwe jest wykorzystanie pomiaru prądu średniego jako miary strumienia neutronowego, gdy średnia częstość zliczeń przekracza górną granicę pomiaru w zakresie impulsowym  $/10^5 \text{ imp/s}$ .

W rezultacie, przy wykorzystaniu zakresów: impulsowego i prądowego - łączny zakres pomiaru strumienia neutronowego przy pomocy linii ILR-5 wynosi nieco powyżej 9 dekad.

Szczególną cechą linii i ważną zaletą przy eksploatacji jest możliwość sprawdzenia działania całości traktu pomiarowego bez strumienia neutronowego. Wykorzystuje się do tego celu impulsy od cząstek alfa emitowanych przez uran użyty do pokrycia elektrod komory. Przy najniższych poziomach strumienia neutronowego występujących przy reaktorze wyłączonym i przy zbliżaniu się do krytyczności, wiarygodny pomiar umożliwiają jedynie detektory wewnątrzrdzeniowe. Komory te o średnicach 5,5 mm wprowadzane są do suchych kanałów sięgających do rdzenia

reaktora poprzez pokrywę zbiornika ciśnieniowego i wyprowadzenie sygnałów możliwe jest jedynie przy użyciu kabla o izolacji mineralnej, przy czym z uwagi na warunki otoczenia niemożliwe jest stosowanie jakichkolwiek transformatorów lub przedwzmacniaczy w pobliżu detektora. Zastosowano w związku z tym odmienny system odbioru sygnałów z detektora - wejście pierwszego wzmacniacza dopasowane jest do rezystancji falowej kabla - a zatem przekazywania i wzmacniania niezniekształconych impulsów prądowych wytworzonych w detektorze. W efekcie, w linii typu ILR-4 czas rozdzielczy całej linii określony jest głównie przez detektor i wynosi ok. 100 ns, co upoważnia do prowadzenia pomiarów w reżimie impulsowym do  $10^6 \text{ imp/s}$  /z błędem statystycznym 10%/.

Przy zastosowaniu detektora zewnątrzrdzeniowego o konstrukcji podobnej jak detektor linii ILR-5, tj. połączonego dwoma kablami dla zasilania elektrody napięciowej napięciem ujemnym, linia ILR-4 może pracować również w zakresie prądowym pokrywając w sumie ponad 9 dekad zmian strumienia, przy czym obszar pokrywania się zakresów: prądowego i impulsowego jest większy niż dla ILR-5, wobec pracy w zakresie impulsowym do poziom  $10^6 \text{ imp/s}$ . Ma to istotne znaczenie przy pracy detektora w obecności dużego tła promieniowania  $\gamma$ .

Wobec przenoszenia przez łączy kablowe niskich poziomów sygnałów o szerokim widmie, poprawna praca linii ILR-4 wymaga stosowania specjalnych kabli koncentrycznych o wysokim stopniu zaekranowania - dla wyeliminowania wpływu zakłóceń elektrycznych na pomiar. W ostatnich latach powstało, specjalnie dla tego rodzaju zastosowań, szereg typów kabli, z których najlepsze produkowane są przez firmę FILECA /Francja/ i BICC /W. Brytania/. Zastosowanie tego typu kabli zapewnia prawidłową pracę aparatury w obecności zakłóceń. Jednocześnie dzięki zmniejszeniu ilości kabli i złącz uzyskuje się większą niezawodność konstrukcji.

Układy obróbki sygnałów w obu liniach są podobne i składają się z: analogowego Integratora logarytmicznego, logarytmicznego wzmacniacza prądu stałego, wzmacniacza różniczkującego sygnał logarytmiczny /tzw. okresomierz/ oraz szeregu układów progowych, sygnalizujących przekroczenie przez wielkości mierzone określonych poziomów. Linie wyposażone są w wewnętrzne źródła sygnałów kalibrujących oraz w stabilizowane źródła zasilania - detektora i aparatury. Dokładniejsze opisy obu linii zawarte są w [7] i [8].

### 4. System pomiarowy

System pomiarowy używany przy badaniach składał się z następujących elementów:

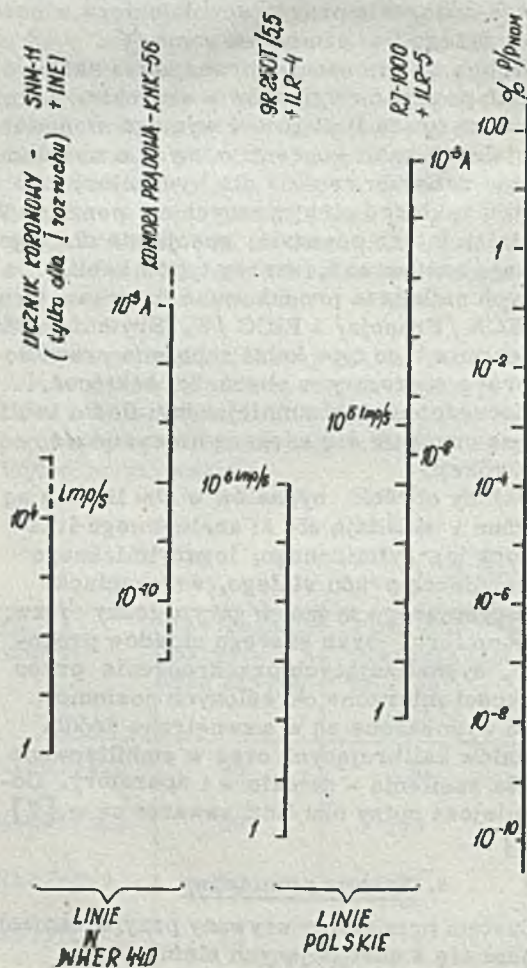
1/ Linia pomiarowa typu ILR-5 z następującymi detektorami:

- 9 R 250 T/5, 5: wewnętrzny detektor o dużej czułości używany przy rozruchu;
- 9 R 12 T/5, 5 i 1 R 3 T/5, 5-0, 1: wewnętrzne detektory używane do pomiaru rozkładu gęstości wydzielania mocy wzdłuż prętów paliwowych i przy rozruchu reaktora;
- RJ-1000: detektor o dużej czułości używany przy rozruchu reaktora i przy przeładunku paliwa.

2/ Linia pomiarowa typu ILR-5 z detektorem RJ-1000, przeznaczona do pomiarów w czasie przeładunku paliwa oraz przy rozruchu reaktora.

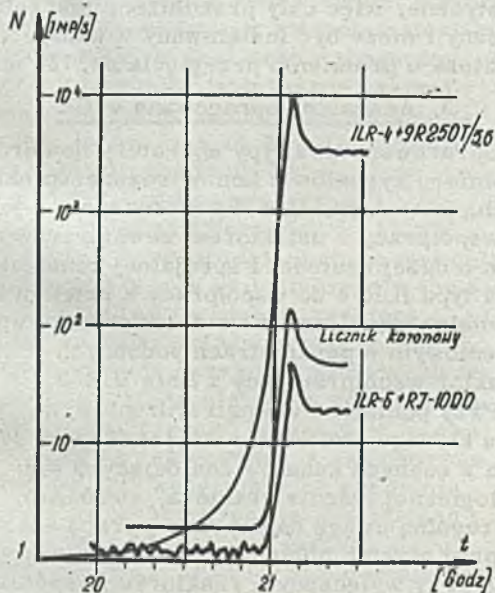
#### 4.1. Rozruch reaktora

Ze względu na bardzo mały poziom strumienia neutronów w rdzeniu w czasie rozpoczynania rozruchu, podstawowym problemem jest uzyskanie jak największej czułości pomiaru. W chwili osiągnięcia stanu krytycznego strumień w rdzeniu reaktora osiąga wartość kilkuset *nv*, w kanałach poza rdzeniem strumień jest około 1000 razy mniejszy. Z tego też powodu do kontroli początku rozruchu stosuje się wysokoczulowy detektor 9R250, umieszczony w kanale w rdzeniu o długości pokrywającej całą wysokość strefy aktywnej, pracujący z linią typu ILR-4. Kanał ten pracuje do poziomu mocy reaktora około  $10^{-5}\%$ .



Rys. 1. Porównanie zakresu pracy linii pomiarowych opracowanego systemu i linii standardowych

Ze względu na bardzo duży obszar zmian strumienia neutronów wynoszący około  $10^{13}$  /13 rzędów/, dla pokrycia całego zakresu rozruchu stosuje się dodatkowo linię ILR-5 z detektorem o dużej czułości umieszczonym w kanale na zewnątrz rdzenia reaktora. Kanał ten pokrywa zakres od około  $10^{-7}\%$  do  $10\%$  mocy nominalnej reaktora /zakresy pomiarowe linii pokazano na rys. 1/.

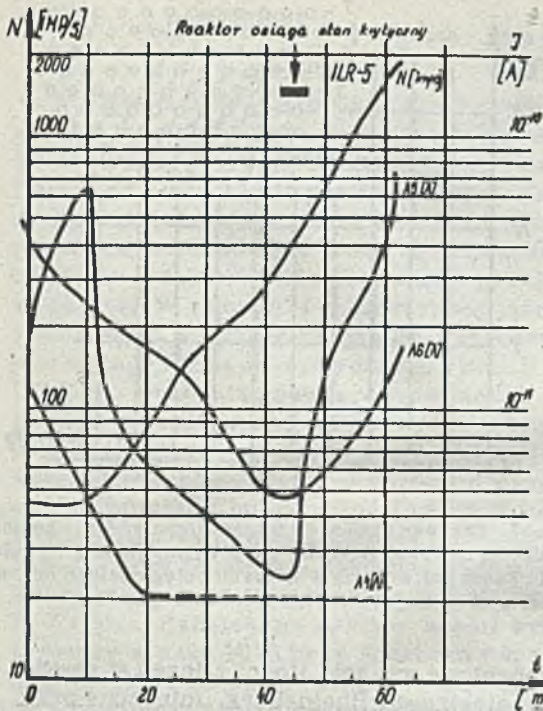


Rys. 2. Wskazania linii pomiarowych ILR-4 i ILR-5 oraz linii standardowej z licznikiem koronowym w czasie rozruchu reaktora II bloku elektrowni Kolskiej, 1974 r. Przed rozruchem linia ILR-5 wskazuje poziom impulsów alfa.

Na rysunku pokazano także zakres pomiarowy standardowych linii stanowiących wyposażenie reaktora. W czasie pierwszego rozruchu nowego reaktora stosuje się dodatkowo linie pomiarowe z licznikami koronowymi o czułości około pięciokrotnie wyższej niż czułość linii ILR-5. Ich zastosowanie ogranicza się jednak tylko do pierwszego rozruchu, gdy w reaktorze nie występuje praktycznie promieniowanie gamma. Przy następnych rozruchach, zastosowanie liczników koronowych jest już niemożliwe ze względu na ich dużą wrażliwość na promieniowanie gamma, występujące w reaktorze nawet po krótkim okresie pracy na mocy.

Na rys. 2 pokazano przebieg pomiaru w czasie pierwszego rozruchu reaktora II bloku energetycznego elektrowni na Półwyspie Kolskim.

Linie standardowe wyposażone w różnicowe komory jonizacyjne, których zakres pracy przedstawiono na rys. 1, okazują się także nieprzydatne w przypadku konieczności dokonania rozruchu reaktora w krótkim okresie po wyłączeniu, które mogło nastąpić np. z powodu krótkotrwałej awarii. Ponowne szybkie włączenie reaktora jest konieczne ze względu na zatrucie rdzenia reaktora, które osiąga po około 2 godzinach od chwili wyłączenia



Rys. 3. Porównanie wskazań linii ILR-5 i kanałów układu sterowania reaktora elektrowni jądrowej w Rheinsbergu w czasie rozruchu rozpoczętego po 65 minutach od chwili wyłączenia reaktora

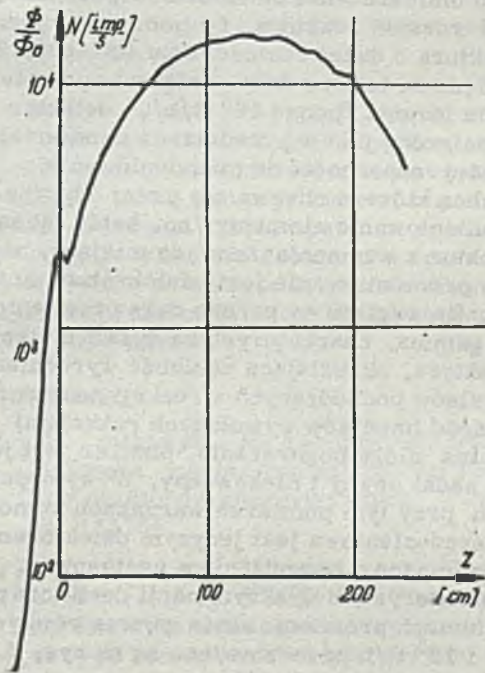
reaktora także rozmiary, że uniemożliwia ponowne osiągnięcie stanu krytycznego, a więc i włączenie reaktora przez okres około 48 godzin.

Nieprzydatność różnicowych komór jonizacyjnych do kontroli rozruchu przebiegającego niedługo po wyłączeniu reaktora polega na tym, że prąd detektorów nie jest proporcjonalny do strumienia neutronów, gdyż zawiera składową pochodzącą od szybko malejącego poziomu promieniowania gamma. Przebiegi sygnałów zmierzonych w czasie takiego rozruchu za pomocą linii ILR-5 i standardowych linii z komorami jonizacyjnymi przedstawiono na rys. 3. Jak pokazano na rysunku, dopiero po około 30 minutach od chwili rozpoczęcia rozruchu i kilka minut po osiągnięciu przez reaktor stanu krytycznego, dwie spośród trzech linii standardowych były zdolne do pracy. Nagły wzrost mierzonego prądu np. w linii A5 powoduje powstanie sygnału odpowiadającego krótkiemu okresowi, który może ponownie spowodować wyłączenie awaryjne reaktora, po którym następny rozruch w krótkim czasie nie jest już możliwy.

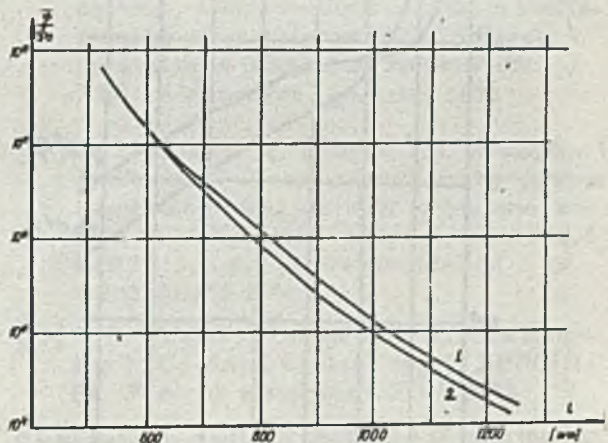
#### 4.2. Pomiar rozkładu wydzielania energii wzdłuż kaset paliwowych

Po osiągnięciu mocy wynoszącej około  $10^{-5}$  % mocy nominalnej możliwe jest już wykonanie pomiaru gęstości strumienia neutronów w rdzeniu reaktora za pomocą detektorów 9R12T/5, 5 i linii typu ILR-4. W tym celu detektor, którego długość czynna wynosi około 90 mm, przesuwa się kolejno wzdłuż kanałów znajdujących się w rdzeniu reaktora i notuje wartość zmierzonego strumienia neutronów.

Na rysunku 4 przedstawiono wykres rozkładu gęstości strumienia neutronów wzdłuż kasy paliwowej reaktora w Kozłoduju. Jak wykazały pomiary wykonane w reaktorach elektrowni w Kozłoduju i na półwyspie Kola, stosunek maksymalnej do średniej wartości wydzielania mocy wynosi od 1,33 do 1,60. Pomiary wykonane później przy mocy około 1,5% za pomocą aktywacji drutów miedzianych różniły się od uzyskanych wcześniej nie więcej niż o 5%. Użycie komór rozszczepiowych pozwoliło także na wykonanie pomiaru rozkładu gęstości strumienia w kanałach



Rys. 4. Rozkład strumienia neutronów termicznych wzdłuż kasy paliwowej. Reaktor I bloku Elektrowni Kozłoduj, 1974 r.

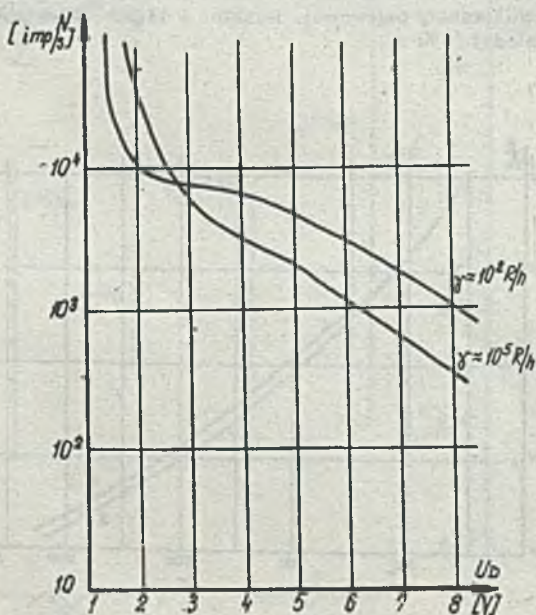


Rys. 5. Rozkład strumienia neutronowego ponad strefę aktywną przy różnych koncentracjach kwasu bornego 1-6, 2 g/l moc reaktora około 1%: 2-7, 04 g/l - moc reaktora 18%. Reaktor I bloku Elektrowni Kozłoduj 1974 r.

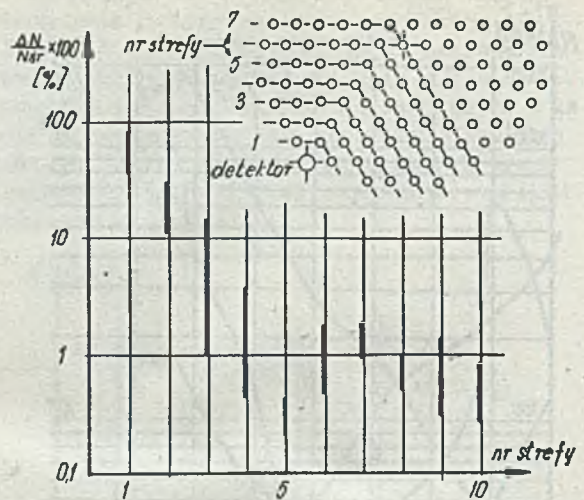
powyżej strefy aktywnej. Podczas pomiarów stwierdzono zależność przebiegu rozkładów od koncentracji boru w wodzie obiegu pierwotnego, co pokazano na rys. 5. Zależność ta będzie przedmiotem dalszych badań, gdyż rokuje ona nadzieję na stworzenie prostej metody natychmiastowego pomiaru koncentracji boru w wodzie.

#### 4.3. Kontrola rdzenia reaktora w czasie przeładunku paliwa

Przeładunku dokonuje się po wyłączeniu reaktora i rozhermetyzowaniu zbiornika ciśnieniowego. Z tego względu istnieje możliwość umieszczenia detektora bezpośrednio przy rdzeniu reaktora. Do pomiaru używa się detektora o dużej czułości typu RJ-1000. Ze względu na bardzo duże natężenie promieniowania gamma /ponad  $10^5$  R/h/, detektor zaopatrzone jest w przedłużacz z materiałów o dużej odporności na promieniowanie, za pomocą którego odsuwa się mniej odporne na promieniowanie elementy /np. kable łączące detektor z wzmacniaczem/ do miejsca, w którym promieniowanie jest wielokrotnie mniejsze. Ze względu na bardzo duże promieniowanie gamma, charakterystyka dyskryminacji detektora, określająca zdolność wyróżniania impulsów pochodzących z reakcji neutronowych spośród impulsów wywołanych reakcjami gamma ulega pogorszeniu, pomiar jest jednak nadal pewny i niezawodny. W występujących przy tym pomiarze warunkach komora rozszczepieniowa jest jedynym detektorem, który można z powodzeniem zastosować. Charakterystyki dyskryminacji detektora przy poziomach promieniowania gamma równych  $10^2$  i  $10^5$  R/h przedstawione są na rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyka dyskryminacji komory RJ-1000 i linii ILR-5 przy różnych natężeniach promieniowania gamma. Strumień neutronowy jest różny w obu przypadkach. Reaktor elektrowni Rheinsberg, 1972 r.



Rys. 7. Zakresy zmian częstości impulsów z komory rozszczepieniowej RI-1000 przy wyjmowaniu i wkładaniu kaset paliwowych w różnych odległościach od detektora. Reaktor elektrowni Rheinsberg, 1972 r.

Procentowe zmiany ilości zliczeń w reaktorze elektrowni Rheinsberg, mierzone przy przeładunku kaset znajdujących się w różnych odległościach od detektora pokazano na rys. 7. Jak widać na rysunkach, nawet w przypadku manipulacji kasetami znajdującymi się w środku rdzenia, a więc najbardziej oddalonymi od detektora /w przypadku zastosowania co najmniej dwóch linii pomiarowych/, zmiany ilości zliczeń są większe od dokładności pomiaru, która wynosiła około 0,1%. W przypadku reaktora WWER 440, którego rdzeń jest znacznie większy od rdzenia reaktora w Rheinsbergu, wyniki mogą być jednak inne. W celu ustalenia możliwości kontroli rdzenia reaktora WWER 440, planuje się przeprowadzenie w roku 1976 serii pomiarów w czasie przeładunku jednego z reaktorów radzieckich. Dokładniejsze wyniki pomiarów wykonanych w czasie przeładunku znajdują się w [9].

#### 4.4. Porównanie opracowanego systemu pomiarowego z wyposażeniem standardowym reaktora

Aparatura opracowanego systemu rozszerza granice, w których mierzony jest strumień neutronów i kontrolowany jest stan strefy aktywnej o ponad dwie dekady, gdyż niewrażliwe na zakłócenia linie pomiarowe pozwalają na niezawodny i pewny pomiar oraz kontrolę stanu strefy aktywnej także w zakresie poniżej ilości zliczeń równej 1 imp/s, po dołączeniu do linii przelicznika i - jeśli trzeba - urządzenia rejestrującego, na przykład drukarki. Niewrażliwość komory rozszczepieniowej na wysoką temperaturę i duży poziom promieniowania gamma czynią pomiar i kontrolę wysoce niezawodnymi i niezależnymi od zakresu i historii pracy reaktora. Miniaturowe komory rozszczepieniowe pozwoliły po raz pierwszy na pomiar rozkładów strumienia neutronów w strefie aktywnej i po-



nad strefą przy bardzo małych mocach, rzędu 10<sup>-5</sup> mocy nominalnej.

### 5. Zakończenie

Elementy przedstawionego systemu pomiarowego zostały wdrożone w kilku obiektach. W elektrowni jądrowej w Rheinsbergu zainstalowano na stałe 3 linie pomiarowe typu ILR-5, służące do pomiarów zewnątrzrdzeniowych. Są one używane od 1973 roku do prowadzenia rozruchu reaktora oraz do kontroli przeładunku paliwa. W roku 1974 w elektrowni jądrowej w Kozłoduju w Bułgarii użyto do rozruchu pierwszego bloku energetycznego, linii ILR-4 i ILR-5, dokonując pomiarów wewnątrz - i zewnątrzrdzeniowych. Na podstawie zalecenia, które znalazło się w dokumencie omawiającym wyniki pomiarów, przeprowadzonych wspólnie ze specjalistami bułgarskimi i radzieckimi, elektrownia zamówiła po jednej linii ILR-4 i ILR-5 i przy ich użyciu dokonano rozruchu drugiego bloku energetycznego w roku 1975. W Związku Radzieckim system został wykorzystany w roku 1973 przy rozruchu fizycznym IV bloku energetycznego elektrowni w Nowoworoneżu i przy rozruchu drugiego bloku elektrowni na półwyspie Kolskim w roku 1974. Przy pomiarach używano linii ILR-4 i ILR-5 przeprowadzając pomiary strumienia neutronowego w czasie rozruchu oraz pomiary rozkładu tegoż strumienia wzdłuż kaset paliwowych przy niskich poziomach mocy.

Zastosowanie proponowanego systemu przynosi oprócz niewymiernych korzyści /zwiększenie bezpieczeństwa pracy reaktora i zwiększenie jego niezawodności systemu/, również określone efekty wymierne. Zastosowanie systemu do pomiarów w czasie rozruchu reaktora pozwala na skrócenie procedury rozruchu przez jej kontrolę od najniższych poziomów mocy. W tym obszarze rozruch dokonywany był dotychczas "na ślepo" i bardzo powoli.

Niezawodność wskazań aparatury w przypadku rozruchu po krótkim wyłączeniu reaktora, gwarantuje możliwość dokonania rozruchu w przypadkach, gdy aparatura standardowa nie zapewniała możliwości rozruchu /patrz pkt. 4.2./. Pewny i niezawodny pomiar stanu strefy aktywnej w czasie przeładunku paliwa, pozwala na zmniejszenie koncentracji kwasu bornego w wodzie obiegu pierwotnego i skrócenie czasu zużywanego na jego usunięcie z obiegu pierwotnego do poziomu, przy którym dokonać można rozruchu reaktora. Na przykład zmniejszenie koncentracji kwasu bornego z 12 do 9 g/l skraca czas jego usuwania o ponad dobę. Zwiększenie czasu dostępności reaktora ma istotne znaczenie jeśli zważyć, że wartość dostarczonej przez blok o mocy 440 MW w ciągu doby energii elektrycznej, wynosi ponad 9 mln zł.

Także przyspieszenie pomiarów rozkładu strumienia w rdzeniu i wykonanie ich już na mocach rzędu ułamków procenta, pozwala

na wcześniejsze wykonanie rozruchu energetycznego reaktora, a zatem - na szybsze uruchomienie reaktora po przeładunku.

Dalsze prace badawcze i pomiarowe prowadzone są w szerokim zakresie i obejmują na przykład stałe wprowadzenie ulepszeń wynikających z rozwoju elektroniki i doskonalenia technologii jak i metod pomiarowych. W opracowaniu znajdują się nowe typy linii pomiarowych: linia pomiarowa ILR-6, w której wykorzystuje się zasadę pomiaru fluktuacji strumienia neutronów, specjalnie użyteczna przy pomiarach w bardzo dużym promieniowaniu gamma do 10<sup>7</sup> R/h [10] i linia szerokozakresowa mierząca strumień neutronów i okres reaktora bez przerwy w zakresie ponad 9 dekad [11].

Wykorzystując aparaturę opracowywaną dla reaktorów energetycznych, zaprojektowano i wykonano odmianę linii ILR-5 specjalnie przeznaczoną do pomiarów w zestawach krytycznych, którą zakupuje Instytut im. Kurczatowa w Moskwie. Część systemu pomiarowego znajduje także zastosowanie w rozpoczynanych obecnie pracach w dziedzinie diagnostyki szumowej reaktorów, prowadzonych wspólnie z tym instytutem.

### Literatura

- [ 1 ] A. Janikowski, M. Kluczyk, K. Dobrski - "Komora jonizacyjna do kontroli rozruchu reaktorów energetycznych" Patent nr 165764
- [ 2 ] A. Janikowski, J. Łopuszyński, J. Kot, K. Dobrski, M. Kluczyk - "Opracowanie modeli wysokotemperaturowych miniatury komór rozszczepieniowych R-1T, 9R-1T i 9R-250/5, 5" Opracowanie IBJ Nr 0-230/IXA/73, XI 73 r.
- [ 3 ] A. Janikowski, A. Kosycarz, K. Pieczelnicz, J. Połuszyński-Detektory i podwieski dla sistemi SUZ jądriennych reaktorow. Nauczno-tiehnicheskaja konfieriencija stran-czenow SEW "Kontrol i upravlieniye jądriennymi reaktorami" i AES Warszawa, grudzień 1973
- [ 4 ] J. Jabłońska, K. Dobrski, M. Kluczyk, J. Chyćko - "Dokumentacja konstrukcyjna i technologiczna, warunki techniczne komór 9R250T/5, 5 9R100T/5, 5, 9R12T/5, 5 i 1R3T/5, 5-0, 1" Opracowanie IBJ nr 0-208/XII/75 z 74 r.
- [ 5 ] E. P. Fowler. "On the Interference Immunity of Co-Axial Cables" raport NPPCI/IC/P6, Winfrith symposium IAEA 1972.
- [ 6 ] FILECA. Bulletin technique d'information nr 1/3 - wydawnictwo firmowe.

/dokończenie na str. 92/

mgr inż. JACEK KANIEWSKI  
doc. mgr inż. PRZEMYSŁAW SZULC  
mgr inż. TADEUSZ ZIELIŃSKI

Instytut Badań Jądrowych  
Świerk

## SAKOR-B - SYSTEM BLOKOWEJ APARATURY

### NEUTRONOWEJ KONTROLI MOCY GLOBALNEJ REAKTORÓW

#### 1. Wstęp

W całości oprzyrządowania pomiarowo-kontrolnego elektrowni jądrowej pomiary i kontrola parametrów jądrowych nie są najliczniejszą grupą aparatury, mają jednak szczególne znaczenie. W grupie tej najliczniejsza jest aparatura dozymetryczna, natomiast najostrzejsze wymagania stawia się aparaturze kontrolującej strumień neutronów w reaktorze i wielkości pochodne /okrąg, reaktywność/, gdyż na tych pomiarach opierają się m. in. systemy zabezpieczeń reaktora i układy regulacji globalnej mocy, a także rozkładu mocy w rdzeniu. Pomiarów parametrów jądrowych - przede wszystkim pomiarów neutronowych - wykorzystywane są także do innych ważnych celów, takich jak diagnostyka elementów rdzenia /wykrywanie niepożądanych wibracji i drgań/, wykrywanie nieszczelności elementów paliwowych i nieszczelności obiegów, kontrola stężenia kwasu borowego w wodzie chłodzącej itp.

W elektrowniach jądrowych - gdzie jest szczególnie pożądane poddanie mnogości informacji wstępnemu przetworzeniu i selekcji przed rejestracją czy prezentacją operatorowi - linie kontrolno-pomiarowe powinny być przystosowane do współpracy z systemem CRPD i do perspektywy bezpośredniej ingerencji maszyny cyfrowej w proces sterowania i regulacji /np. sterowanie nastawami wartości żądanych/. Współpraca taka nie może jednak sprowadzać niebezpieczeństwa /w przypadkach niesprawności, np. zwarcia wyjść sygnałów/ sparaliżowania priorytetowych funkcji, szczególnie funkcji zabezpieczeń. W systemach kontroli parametrów jądrowych reaktorów stosuje się więc specjalnie zaprojektowaną i przebadaną aparaturę i detektory. Jest to kłopotliwe i drogie, bo dla jednego bloku energetycznego trzeba dostarczyć wiele typów aparatury - każdego tylko po kilka sztuk. Czy warto więc w Polsce opracowywać i produkować taką aparaturę? Odpowiedź może być pozytywna nawet w skali potrzeb krajowych - a tym bardziej przy pewnych kooperacyjnych powiązaniach z krajami RWPG. Szczególnie, jeśli

będzie to aparatura modułowa w której z ograniczonej ilości bloków funkcjonalnych można zestawiać różnorodne tory, linie i zestawy pomiarowo-kontrolne, zarówno dla reaktorów energetycznych jak i badawczych. Aparatura ta musi również spełniać odpowiednie wymagania i zalecenia międzynarodowe.

Na takich właśnie założeniach oparty został, opracowywany w IBJ, system aparatury kontroli reaktorów SAKOR-B.

#### 2. Czujniki współpracujące z aparaturą SAKOR-B

Podstawowymi czujnikami /detektorami/, z którymi współpracuje wymieniona aparatura - są impulsowe i prądowe detektory promieniowania neutronowego oraz gamma, a przede wszystkim neutronowe komory jonizacyjne /interesujący zakres prądów od poniżej  $10^{-11}$  do prawie  $10^{-3}$  A/, neutronowe impulsowe komory rozszczepieniowe /zakres od 1 do  $10^6$  imp/s/ oraz komory jonizacyjne gamma /zakres prądów od  $10^{-13}$  A/. Możliwa jest współpraca z innymi rodzajami detektorów promieniowania /prądowych i impulsowych/ przy rozszerzeniu asortymentu bloków wejściowych wzmacniaczy.

#### 3. Podstawowe funkcje torów i zespołów SAKOR-B

Strumień neutronów w reaktorze - proporcjonalny do ilości rozszczepień zachodzących w jednostce czasu w rdzeniu reaktora - jest tym samym miernikiem generowanej mocy. Jego pomiar może być dokonywany z bezwładnością pomijalną w porównaniu z pomiarami ciepło-przepływowymi. Dlatego na kontroli poziomu i ewolucji strumienia neutronów opierają się zarówno zabezpieczenia, jak i regulacja mocy reaktora. Moc ta zmienia się w granicach 10 do 12 dekad. Do kontroli trzeba używać różnych detektorów i różnych torów pomiarowo-kontrolnych o zalegających się zakresach lub sumowanych sygnałach i o wyjściu linearnym /proporcjonalnym/ lub logarytmicznym. Główne funkcje tych torów, to:

- zabezpieczenie przed przekroczeniem na-

stawionego poziomu mocy /pomiar w skali na ogół liniowej/,

- zabezpieczenia przed przekroczeniem nastawionej prędkości zmian mocy - lub tzw. okresu reaktora /pomiar w skali logarytmicznej + pochodna/.
- dokładny /np. uśredniony z kilku detektorów/ pomiar poziomu mocy globalnej,
- regulacja poziomu mocy lub prędkości zmian według narzuconego programu.

Przykłady torów realizujących takie funkcje zostaną omówione w dalszej części artykułu.

#### 4. Specyficzne wymagania stawiane aparaturze reaktorowej

Wymagania te sprecyzowane są w szeregu dokumentów krajów rozwiniętych, a także w dokumentach o zasięgu międzynarodowym - m.in. rekomendacjach IEC /podkomitet 45A "Reactor Instrumentation"/. Streszczając - są to wymagania niezawodnego wykonywania priorytetowych funkcji zabezpieczających i wysokiej pewności ruchu funkcji operacyjnych. Ponieważ wymagana niezawodność w systemach można uzyskać m.in. dzięki zastosowaniu redundancji, wymaga się przede wszystkim eliminowania przyczyn zakłóceń lub uszkodzeń zależnych, mogących występować równocześnie /z tego samego powodu/, w równoległe działających torach pomiarowo-kontrolnych. Stąd rodzi się szereg wymagań szczegółowych dotyczących aparatury i konieczność pełnej galwanicznej izolacji wyjść analogowych i logicznych od obwodów zewnętrznych, wysoka kompatybilność elektromagnetyczna /odporność na zakłócenia elektromagnetyczne/, wytrzymałość wyjść i wejść na prawdopodobne przepięcia, daleko posunięte konstrukcyjne zabezpieczenia przed błędami obsługi, automatyczne wykrywanie i sygnalizowanie niesprawności /przynajmniej typowych/, możliwość "in-service testing" - okresowej kontroli sprawności w czasie pracy oraz wykrywania tzw. defektów niebezpiecznych.

#### 5. Konstrukcja aparatury systemu SAKOR-B

Konstrukcja aparatury systemu jest przeznaczona specjalnie dla aparatury reaktorowej. Spełnia ona wymagania określone zaleceniami IEC i wykorzystuje elementy konstrukcyjne bloków i kaset CAMAC. Wiele rozwiązań konstrukcyjnych i zasadnicze wymiary są typowe dla systemu CAMAC o wysokości obniżonej do "4U". Konstrukcja składa się z bloków funkcjonalnych o zmodułowanej szerokości, umieszczanych na przewodnicach w kasetach zbiorczych /rys. 1/ grupujących aparaturę torów pomiarowych lub zespołów. System umożliwia wykonanie torów pomiarowych w trzech wariantach konstrukcyjnych:

B/ Kasetę zbiorczą bez przedniej płyty osłonnej,

C/ Instalację bloków bezpośrednio w odpowiednio okablowanych szafach.

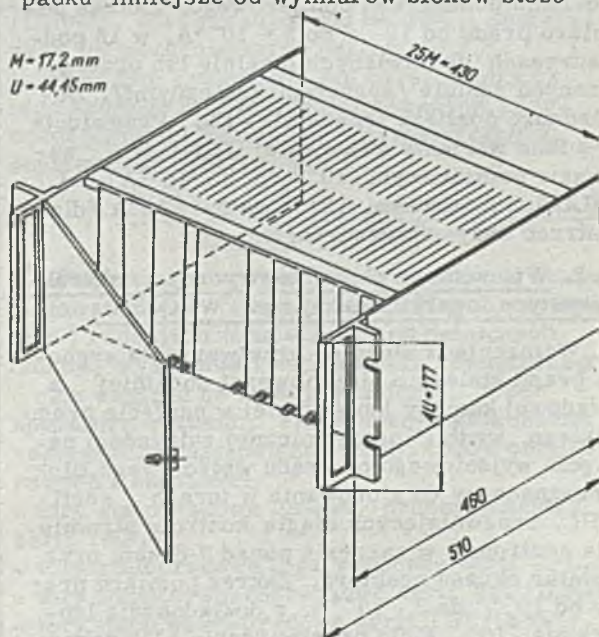
W pierwszym etapie opracowano wariant "A", którego rozwiązanie konstrukcyjne nosi nazwę KOMAR-74 /Konstrukcja modułowa aparatury reaktorowej/. Kasetę tego typu ma płytę czołową dającą się otwierać w lewo o kąt  $180^\circ$  i zamykaną specjalnym zamkiem. Bloki wsuwane są na przewodnicach od przodu kasety /po otwarciu płyty przedniej/. Odległość między płytami czołowymi bloków a płytą przednią kasety wynosi 100 mm. Kasetę wyposażona jest w listwy izolujące bloki od konstrukcji kasety.

Z tyłu kasety znajduje się okablowanie, które poprzez zespół gniazd głównych typu D-SUB zapewnia połączenia między blokami. Połączenia bloków z układami zewnętrznymi dokonuje się za pomocą złącz zainstalowanych na płytach tylnych powyżej połowy wysokości bloku.

Płyta czołowa kasety /odchylana/ przeznaczona jest wyłącznie do instalowania wskaźników /mierników/ i sygnalizatorów świetlnych. Wszystkie elementy nastawcze i regulacyjne, a także sygnalizacyjne, które nie muszą lub nie powinny być łatwo dostępne podczas normalnej eksploatacji układu znajdują się na płytach czołowych bloków i zasłonięte są przednią płytą kasety.

O wyborze opisanego wyżej rozwiązania konstrukcyjnego zdecydowały następujące powody:

- Maksymalne wykorzystanie elementów konstrukcji systemu CAMAC, uwzględniające jednakże specyficzne wymagania /ustalenia i zalecenia IEC/ analogowej aparatury reaktorowej.
- Wymiary bloków i kaset są w każdym przypadku mniejsze od wymiarów bloków stoso-



Rys. 1.

wanych w radzieckiej aparaturze, co zapewnia łatwą możliwość przejścia na konstrukcję według wymagań radzieckich w przypadku zaistnienia takiej konieczności.

- Lepsze funkcjonalnie wykorzystanie powierzchni montażowej w blokach przy stosowaniu elementów układów techniki analogowej.

- Podobne opracowania o takich samych wymiarach wykonuje firma Tesla, co daje możliwość wzajemnej wymiany bloków lub uzupełnień.

#### 6. Wymagania środowiskowe

Aparatura reaktorowa systemu SAKOR-B podczas pracy w miejscu zainstalowania oraz podczas transportu i składowania spełnia warunki środowiskowe dotyczące zakresu temperatury otoczenia, wilgotności oraz odporności na wstrząsy i wibracje, odpowiadające właściwym normom PN/E grupy I.

Ze względu na konieczność dostosowania się do zaleceń IEC, warunki te w części dotyczącej zakresu temperatury otoczenia zostały nieznacznie zmodyfikowane przez przesunięcie zakresu temperatury od  $+10^{\circ}\text{C}$  do  $+45^{\circ}\text{C}$ , przy wilgotności względnej od 45% do 75%.

#### 7. Podstawowy asortyment bloków funkcjonalnych systemu

##### 7.1. Wzmacniacz elektrometryczny liniowy typu WLI-5.1

Wzmacniacz służy do wzmacniania i normalizacji stałoprądowego sygnału o polaryzacji dodatniej z komory jonizacyjnej. W bloku WLI przewidziano możliwość korekcji rozrzutu czułości komór jonizacyjnych. Zastosowano sygnalizację przekroczenia górnego i dolnego poziomu podzakresu pomiarowego. Zakres pomiaru prądu od  $10^{-11}$  do  $3 \cdot 10^{-4}\text{A}$ , w 16 podzakresach nastawianych lokalnie lub przełączanych zdalnie /sygnałami logicznymi/. Dokładność pomiaru lepsza niż -1%. Przewiduje się inne warianty wykonania: WLI-5.0 o zakresie pomiarowym  $10^{-8}$  do  $3 \cdot 10^{-4}\text{A}$  i WLI-5.2 o zakresie  $10^{-13}$  do  $3 \cdot 10^{-8}\text{A}$  /dla potrzeb dozymetrycznych/.

##### 7.2. Wzmacniacz elektrometryczny o charakterystyce logarytmicznej typu WLG-5.0

Wzmacniacz służy do przetwarzania sygnału prądu stałego o biegunowości dodatniej z prądowej komory jonizacyjnej w napięcie prądu stałego, według logarytmicznej zależności napięcia wyjściowego od prądu wejściowego. Blok przeznaczony do stosowania w torach serii TPL, zapewniających ciągłą kontrolę strumienia neutronów w zakresie ponad 7 dekad oraz pomiar okresu reaktora. Zakres pomiaru prądu od  $10^{-11}$  do  $3 \cdot 10^{-4}\text{A}$ , z dokładnością lepszą niż +10%. Stała przetwarzania +1V/dekadę.

##### 7.3. Wzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu typu WRW-5.0 lub WRW-5.1

Blok WRW służy do dostrajania wartości wzmocnienia w torach TPP. Umożliwia nastawianie pośrednich wartości zadanych strumienia neutronów /prądu komory/, między wartościami określonymi przez wartość włączonego podzakresu elektrometru WLI oraz korekcję czułości toru pomiarowego. Nastawy wartości wzmocnienia mogą być miejscowe lub sterowane zdalnie za pomocą 4-bitowych sygnałów logicznych według określonego kodu. Wariant WRW-5.1 ma dwustopniowy układ regulacji wzmocnienia, każdy o zakresie regulacji od 1 do 3, 3.

##### 7.4. Nastawnik wartości zadanej typu NWZ-5.0 lub NWZ-5.1

Blok NWZ pośredniczy w nastawianiu zdalnym wartości podzakresu pomiarowego w bloku elektrometru liniowego WLI oraz wzmocnień wzmacniaczy bloku WRW w stałoprądowych torach pomiarowych. Zapewnia on realizację następujących funkcji:

- wprowadzanie nastawy zdalnej podzakresu elektrometru /gdy nie jest ona większa od lokalnej/,
- porównanie tej nastawy z nastawą miejscową WLI i w wypadku przekroczenia - wysłanie sygnału "OVL",
- wprowadzanie nastawy zdalnej wzmocnień w bloku WRW,
- przełączanie miejsca sterowania /np. z pulpitu na komputer/.

Wprowadzanie zdalnych nastaw odbywa się za pomocą sygnałów logicznych w 4-bitowych słowach kodu. Zapewnia to przełączanie 16 podzakresów w elektrometrze WLI i 15 pozycji nastaw wartości wzmocnienia w bloku WRW.

##### 7.5. Blok kontroli toru pomiarowego typu BKT-5.1

Blok przeznaczony do kontroli drożności torów pomiarowych stałoprądowych na odcinku między wejściem sygnału z czujnika i wyjściem sygnału alarmowego. W bloku generowane są 3 rodzaje sygnałów kontrolnych:

- o wartości stałej /regulowanej/,
- o wartości liniowo narastającej,
- o wartości wykładniczo narastającej.

Zakres zmienności sygnałów wynosi 2 dekad /od 1% do 100% wartości znamionowej/. Zakres nastaw wartości znamionowej sygnału prądowego od  $10^{-7}$  do  $10^{-3}\text{A}$ .

##### 7.6. Blok komparatora i układów progowych typu KUP-5.1

Blok ten przeznaczony jest do pracy w torach pomiarowo-zabezpieczających /proporcjonalnych/ serii TPP. Zadaniem jego jest porównanie sygnału wejściowego lub sumy dwu sygnałów wejściowych, odseperowanych od siebie galwanicznie, ze stałym sygnałem odniesienia i wytworzenie sygnałów alarmowych

w przypadku, gdy odchylenie sygnału wejściowego od poziomu odniesienia przekracza określone granice. Blok ten wytwarza też analogowy sygnał niezgodności, który może być wykorzystany do regulacji mocy reaktora.

Sygnał wejściowy napięciowy od  $-15\text{ V}$  do  $+15\text{ V}$   
 $/R_w \geq 10\text{ Kohm}/$

Sygnał wejściowy prądowy od  $+20\text{ mA}$  do  $+20\text{ mA}$   
 $/R_w < 100\text{ ohm}/$

Zakres i skok nastawy prądu sygnalizacji od  $+50\%$  do  $+150\%$  skokowo co  $5\%$ .

#### 7.7. Blok sygnalizacji przekroczeń typu BSP-5.0

Blok służy do sygnalizowania przekroczenia przez analogowy sygnał wejściowy /napięciowy/ określonej wartości krytycznej. Blok ma 3 układy progowe o regulowanym poziomie zadziałania w zakresie od  $+5$  do  $+14\text{ V}$  i jeden układ progowy o stałym poziomie zadziałania  $+5\text{ V}$ .

#### 7.8. Blok przekaźników pośredniczących typu BPP-5.0

Blok pośredniczy w przekazywaniu sygnałów logicznych I grupy, generowanych w odpowiednich blokach funkcjonalnych, do układów zewnętrznych. Blok służy dla rozmnożenia i normalizacji sygnałów logicznych. Zapewnia również izolację układów logicznych od obwodów zewnętrznych. Maksymalna ilość przekazywanych sygnałów logicznych różnych wynosi 8.

#### 7.9. Blok izolacji galwanicznej sygnałów analogowych typu BIG-5.0

Zadaniem bloku jest separacja galwaniczna sygnałów analogowych z dużą dokładnością przetwarzania. Przetwarza on wejściowy sygnał napięciowy na wyjściowy sygnał prądowy, zachowując izolację galwaniczną obu obwodów. Zakres proporcjonalności przetwarzania od 0 do  $+15\text{ V}$ . Współczynnik przetwarzania  $-1\text{ mA/V}$ . Dokładność przetwarzania  $0,1\%$ .

#### 7.10. Blok izolacji sygnałów logicznych

Blok przeznaczony jest do izolacji galwanicznej obwodów sygnałów logicznych informujących, nastawiających i sterujących między aparaturą reaktorową a układami zewnętrznymi. Blok może przenieść 32 bity sygnałów nieodwracalnych i 16 bitów sygnałów odwracalnych. Poziom sygnałów logicznych wejściowych odpowiada poziomowi TTL.

#### 7.11. Miernik prędkości zmian mocy reaktora typu MPZ-5.1

Blok służy do kontroli reaktora przy zmianach poziomu mocy oraz przy zaburzeniach reaktywności w zakresie źródła i w obszarze pośrednim mocy. Ma zastosowanie zarówno w impulsowych jak i stałoprądowych torach pomiarowych, mierzących sygnał z czujnika w skali logarytmicznej. Zakres pomiarowy przy

stałej równej  $1\text{ V/dek/}$  wynosi od  $-1$  do  $+4$  dekad/min. Odpowiedź do stałego poziomu napięcia wyjściowego z przeregulowaniem do  $5\%$ . Uchyb podstawowy statyczny wynosi  $\pm 1\%$ .

#### 7.12. Zasilacz wysokiego napięcia typu ZWN-5.1 lub ZWN-5.2

Zasilacz wysokiego napięcia służy do zasilania komór jonizacyjnych impulsowych lub stałoprądowych. Zakres regulacji napięcia wyjściowego od  $100\text{ V}$  do  $1200\text{ V}$  skokowo co  $100\text{ V}$  i płynnie w zakresie  $100\text{ V}$  na każdym podzakresie. Maksymalny prąd obciążenia  $1\text{ mA}$ . Zasilacz typu ZWN-5.2 ma dwa niezależne napięcia wyjściowe dla zasilania stałoprądowych komór jonizacyjnych z kompensacją prądu od promieniowania gamma. Napięcie wyjściowe dodatnie  $+800\text{ V}$  nieregulowane i napięcie wyjściowe ujemne regulowane od  $-20\text{ V}$  do  $-400\text{ V}$  skokowo i płynnie.

#### 7.13. Zasilacz stabilizowany niskiego napięcia typu w ZNN-5.1

Blok przeznaczony do zasilania napięciami stabilizowanymi bloków funkcjonalnych aparatury systemu SAKOR-B. Blok ten spełnia ponadto następujące funkcje:

- zapewnia izolację obwodów zasilanych od zasilania zewnętrznego,
- tłumí zakłócenia pochodzące z obwodów zewnętrznego zasilania,
- powoduje natychmiastowe wyłączenie napięć zasilających w przypadku zaniku jednego z napięć  $\pm 12\text{ V}$  oraz wzrostu napięcia  $+5\text{ V}$  więcej niż o  $10\%$ ,
- sygnalizuje niesprawność zasilania.

Napięcie zasilające zewnętrzne  $20$  do  $30\text{ V}$  = Napięcie wyjściowe stabilizowane  $\pm 12\text{ V}$ ,  $\pm 18\text{ V}$  i  $+5\text{ V}$  oraz niestabilizowane około  $24\text{ V}$ .

Do bloków funkcjonalnych należy zaliczyć również cały szereg bloków wchodzących w skład impulsowych torów rozruchowych /ILR-4/ i impulsowych torów prądowych /ILR-5/, opracowanych już dawniej i omawianych we wcześniejszych publikacjach.

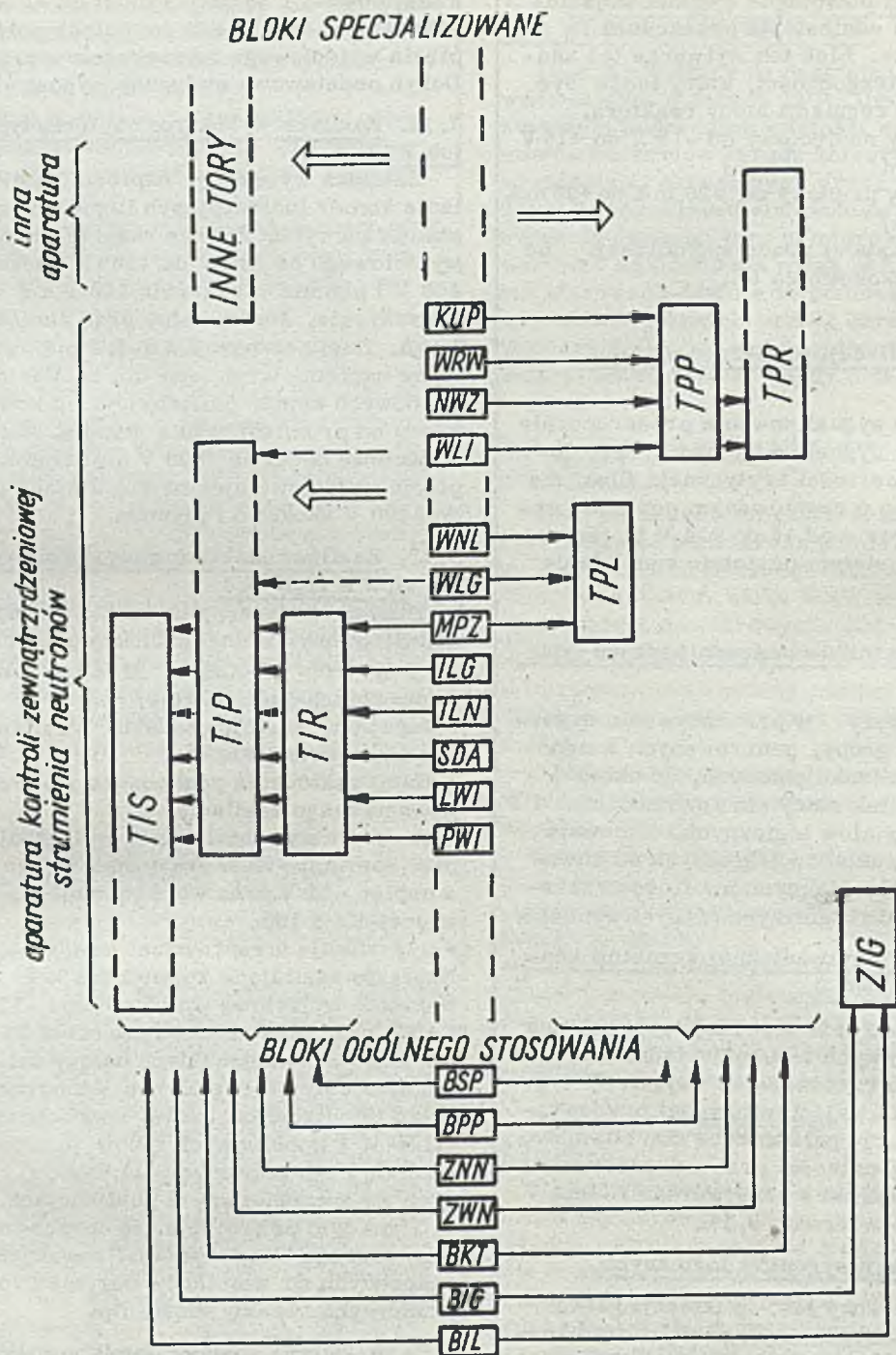
Poza tym przewiduje się opracowanie całego szeregu bloków specjalizowanych, przeznaczonych do pomiarów dozymetrycznych, szumowych, reaktywności itp.

#### 8. Tory i zespoły pomiarowo-kontrolne systemu SAKOR-B

W systemie przewiduje się możliwość kompletowania torów i zespołów w różnych wariantach i rodzajach w zależności od pełnionych funkcji, wykonania i wyposażenia zewnętrznego.

Ze względu na funkcje pełnione przez aparaturę systemu, bloki funkcjonalne można zestawiać w następujące rodzaje torów pomiarowych i zespołów:

- tory stałoprądowe liniowe /proporcjonalne/ serii TPP,
- tory stałoprądowe logarytmiczne serii TPL,
- tory impulsowo-rozruchowe serii TIR /ILR-4/,
- tory impulsowo-prądowe serii TIP /ILR-5/.



Rys. 2.

- tory impulsowo-szumowe serii TIS,
- tory kontroli dozymetrycznej serii TKD,
- tory pomiaru reaktywności serii TPR,
- zespoły regulacji mocy reaktora serii ZRM,
- zespoły logiki koincydencyjnej serii ZLK,
- zespoły izolacji galwanicznej sygnałów serii ZIG,
- zespoły symulacji reaktora serii ZSR.

Schemat możliwości zastosowania różnych rodzajów bloków przedstawia rys. 2, na którym wyodrębniono bloki ogólnego stosowania, wchodzące w zasadzie w skład wszystkich

torów i zespołów oraz bloki specjalizowane, wchodzące w skład tylko określonych torów i zespołów. Rys. 2 przedstawia system "otwarty", przy czym skład przewidywanych niektórych torów nie jest jeszcze określony, ponieważ są one dopiero w trakcie opracowania, ponadto możliwe są dalsze nowe opracowania.

Przykładowo zostaną przedstawione dwa rodzaje podstawowych torów pomiarowych, tory proporcjonalne serii TPP i tory logarytmiczne serii TPL. Tory te przeznaczone są dla oprzyrządowania układów SiZ reaktorów

energetycznych i doświadczalnych, do kontroli zmian strumienia neutronów lub mocy reaktora w obszarze pośrednim i mocy nominalnej.

Zadaniem torów serii TPP są: dokładny pomiar strumienia neutronów w skali liniowej, sygnalizacja odchylenia od wartości zadanej i wytwarzanie analogowego sygnału niezgodności dla regulacji. W skład torów TPP wchodzi następujące bloki funkcjonalne /kolejność jak w kasie/: ZWN-BKT-WLI-NWZ /lub BPZ/ - WRW - KUP/lub BSP/-BPP-ZNN. Zakresy pomiarowe i inne parametry zależą głównie od wybranych bloków WLI oraz WRW. i przy omawianiu ich były opisane.

Zadaniem torów serii TPL jest natomiast pomiar strumienia neutronów w skali logarytmicznej w zakresie ponad 7 dekad, pomiar prędkości zmiany mocy i sygnalizacja alarmowa mocy maksymalnej oraz prędkości zmiany mocy. Tory TPL składają się z następujących bloków funkcjonalnych: ZWN-BKT-WLG-MPZ-WNL-BSP-BPP-ZNN. Zakresy pomiarowe i inne parametry zależą od stosowanych bloków WLG i MPZ.

Przedstawione tory zgodnie z tym, co powiedziano w pkt. 4, w zależności od wymagań mogą być realizowane i wyposażane w jednym z trzech wariantów wykonania A, B lub C.

## mgr inż. ANDRZEJ OSTROWSKI

Instytut Badań Jądrowych

Zakład Elektroniki i Automatyki Reaktorowej

Świerk

## METODY ILOŚCIOWE BADAŃ PRZECIWKŁÓCENIOWYCH

### REAKTOROWYCH LINII KONTROLNO-POMIAROWYCH

#### 1. Wstęp

Układ stosowanych w reaktorach linii pomiarowych składających się detektora, łącza kablowego oraz obwodów elektronicznych przedstawia najogólniej rys. 1. Zależnie od typu pomiaru element oznaczony 1 przedstawia detektor strumienia neutronowego lub jakiegokolwiek inny czujnik pomiarowy /np. akustyczny, mechaniczny/, który połączony jest przez krótki odcinek kabla 2 oraz złącze przejściowe 3 /ewentualnie może to być przedwzmacniacz/, długi odcinek kabla 4, złącze wejściowe 5 - z aparaturą elektroniczną 6, w której na wejściu znajduje się na ogół wzmacniacz o dużym wzmocnieniu i pasmie zależnym od rodzaju pomiaru. Mankamentem tego typu układów jest fakt, iż całość linii pomiarowej musi realizować poprawny pomiar w obecności

Najczęściej jednak w tym przypadku przewiduje się wykonanie w grupie A, to znaczy z odchylaną płytą czołową kasety, w której umieszczone będą mierniki wskazujące mierzone wartości prądów z komór jonizacyjnych i prędkości zmian strumienia. Są tam przewidziane sygnalizatory świetlne zapalające się po przekroczeniu określonych wartości sygnałów, a także sygnalizatory stanu toru /kontrola, niesprawność itp./.

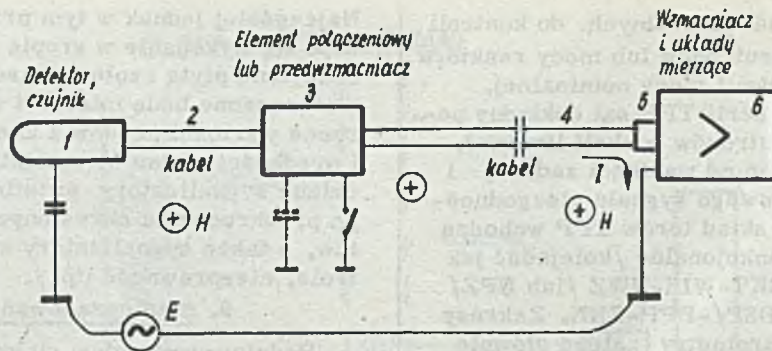
#### 9. Stan opracowań i wdrożeń

Podstawowy zestaw stałoprądowych bloków opracowywany jest od 1974 r. w IBJ, a serie prototypowe wykona ZDAE-IBJ w 1976 r. Przejdą one w 1976/77 r. badania laboratoryjne, w tym technoklimatyczne /próby typu/ oraz próby eksploatacyjne. Na bazie bloków SAKOR-B zostanie m. in. zbudowany nowy układ sterowania i zabezpieczeń reaktora mocy zerowej "AGATA" w IBJ. Po uwzględnieniu wyników tych badań możliwe będzie na przełomie lat 1977/78 wdrażanie aparatury systemu do małoseryjnej produkcji. Według aktualnych ustaleń produkcję przejmą ZZUJ "Polon", które starają się poprzez "Interatomenergo" i "Interatomenergo" o uzyskanie specjalizacji oraz zamówień na aparaturę reaktorową dla krajów RWPG.

silnych zakłóceń elektrycznych typu przemysłowego, natomiast użyteczne sygnały wejściowe odznaczają się na ogół niskimi poziomami. Zapewnienie niezakłóconego pomiaru jest niezbędne z punktu widzenia eksploatacyjnej niezawodności systemu kontroli reaktora. Nie jest to zadanie łatwe w obecnie spotykanych warunkach.

#### 2. Mechanizm oddziaływania zakłóceń

Zakłócenia elektryczne pojawiają się przy włączaniu i wyłączaniu odbiorników dużej mocy, przekaźników układów sterowania, spawarek itp. Źródła zakłóceń powodują powstanie pola magnetycznego lub elektromagnetycznego oraz różnic potencjałów między miejscami uzziemienia odbiornika i jego układu zasilającego.



Rys. 1. Ogólny schemat linii pomiarowej w warunkach zakłóceń przemysłowych

Mechanizm wnoszenia się sygnałów zakłócających do obwodów pomiarowych jest skomplikowany i nie będzie tu szerzej omówiony. Uproszczony model oddziaływania został przedstawiony na rys. 1 jako oddziaływanie zmiennego pola magnetycznego  $H$  i siły elektromotorycznej, reprezentującej różnicę potencjałów między punktem uziemienia aparatury pomiarowej a ziemią w miejscu zainstalowania detektora lub czujnika.

Niezależnie od tego jakie są źródła zakłóceń - prowadzą one do przepływu w elementach ekranujących linii pomiarowej prądu zakłócającego  $I$ , zamykającego się przez obwód ziemi. Prąd  $I$ , natrafiając na rezystancję w obwodzie ekranu, występującą np. wskutek niskiej jakości elementów ekranujących, złącz, a także niskiej przewodności opłotów kabli, wywołuje spadki napięcia, które sprzężone pojemnościowo z przewodem sygnałowym włączają się do obwodu sygnałowego wzmacniacza pomiarowego. Drugim sposobem oddziaływania prądu zakłócającego na obwód sygnałowy może być sprzężenie indukcyjne występujące zwłaszcza przy braku koncentryczności elementów ekranujących /kable i złącz/. W rezultacie, na wejściu wzmacniacza układu mierzającego pojawia się sygnał zakłócający  $V_z$ .

### 3. Parametr charakteryzujący podatność na zakłócenia

Przedstawione podejście pozwala na wprowadzenie parametru ujmującego zjawisko globalnie i charakteryzującego ilościowo całą instalację lub jej elementy /kable, złącza/. Jest to tzw. impedancja przejściowa  $Z_T$  definiowana jako:

$$Z_T = \frac{V_z}{I}$$

gdzie  $V_z$  oznacza sygnał napięciowy na wejściu wzmacniacza pomiarowego, wywołany przez zakłócający prąd  $I$  płynący w ekranie.

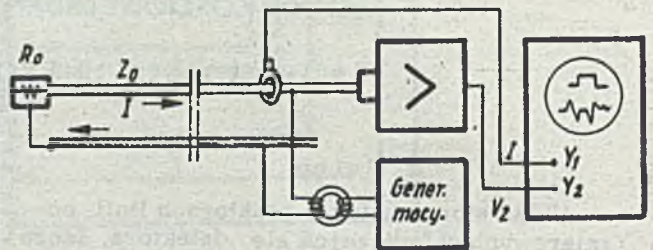
Parametr ten jest oczywiście funkcją częstotliwości. Wartość bezwzględna  $Z_T$  wyznacza się eksperymentalnie na podstawie definicji, drogą pomiaru na wyjściu wzmacniacza pomiarowego sygnału zakłócającego, wywołanego znanym prądem zakłócającym  $I$ , wprowadzonym w obwód ekranu / $V_z$  znajduje

się odnosząc uzyskany sygnał do wejścia wzmacniacza/. Stosowany układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 2a i 2b. Parametr  $Z_T$  można wyznaczyć punktowo dla różnych częstotliwości, używając zakłócającego sygnału sinusoidalnego lub przez pomiar w dziedzinie czasowej - wykorzystując skokowy sygnał zakłócający. Parametr ten można mierzyć dla całej instalacji lub jej części /np. kabel, złącze, itp./ zależnie od tego, przez jakie elementy przebiega testujący sygnał zakłócający.

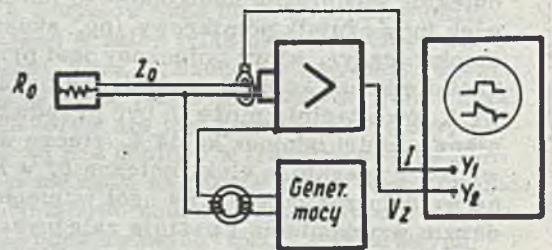
Znajomość wartości  $Z_T$  danego elementu linii umożliwia bezpośrednie obliczenie wielkości sygnału zakłócającego, jaki wniesie dany element linii przy określonym prądzie zakłócającym.

$$V_z = Z_T \cdot I$$

Wielkość  $Z_T$  jest addytywna, jak to wynika z definicji. Można oszacować wypadkową wielkość  $Z_T$  dla całej instalacji jeszcze na etapie projektu - znając lub mierząc wartości  $Z_T$  elementów instalacji. Przyjmując lub



Rys. 2a. Testowanie kabla sygnałem zakłócającym



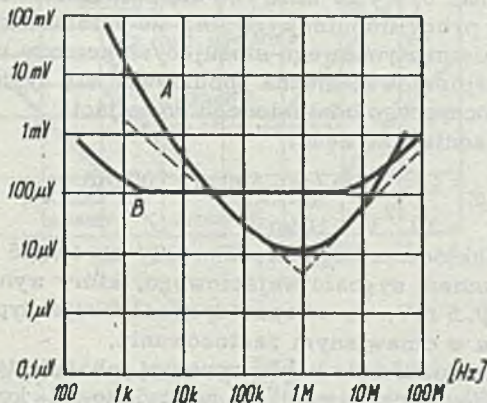
Rys. 2b. Testowanie złącza sygnałem zakłócającym



szacując poziom prądów zakłócających można więc obliczyć poziom zakłóceń w danej instalacji i porównać go z poziomem sygnału użytecznego, co stanowi cenną informację projektową.

#### 4. Poziomy sygnałów zakłócających

Dopuszczalny poziom zakłóceń z punktu widzenia aparatury określonego typu charakteryzuje się tzw. krzywą progową, która podaje w funkcji częstotliwości wartości najmniejszych sygnałów rejestrowanych przez jej układy pomiarowe /np. dla dyskryminatora - przewyższających próg, dla wzmacniacza - przewyższających poziom szumów rejestrowanych przez wskaźnik wyjściowy/. Na rys. 3 podano za [5] przykłady krzywych progowych zdjętych dla dwu różnych wzmacniaczy pomiarowych o dużej czułości.



Rys. 3. Napięcia progowe dwu wzmacniaczy pomiarowych

Występujący w realnych warunkach poziom prądów zakłócających jest różny i zależy w dużej mierze od obowiązujących norm oraz jakości elementów tłumiących, stosowanych przy źródłach zakłóceń. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w reaktorowych instalacjach w Wielkiej Brytanii przez ekipy pracowników Instytutu AEE Winfrith [1] [5], potwierdzonych również przez ekipy mierzące w elektrowniach jądrowych we Francji [9] - przyjmuje się poziom 100 mA wartości skutecznej prądu w ekranie jako wartość, której na ogół nie przekraczają prądy zakłócające. Do testowania instalacji lub jej elementów stosuje się prądy zakłócające o takim lub nieco wyższym /dla uzyskania określonego marginesu bezpieczeństwa/ poziomie, które to prądy wprowadza się za pomocą specjalnych urządzeń w badany obwód ekranujący.

Przyjmując dany poziom prądu zakłócającego oraz mając zmierzoną lub oszacowaną na podstawie danych elementów instalacji wartość  $Z_T$  można porównać spodziewane wielkości sygnałów zakłócających z krzywą progową urządzenia i ocenić jego podatność na zakłócenia elektryczne.

#### 5. Układy do testowania instalacji oraz pomiaru $Z_T$

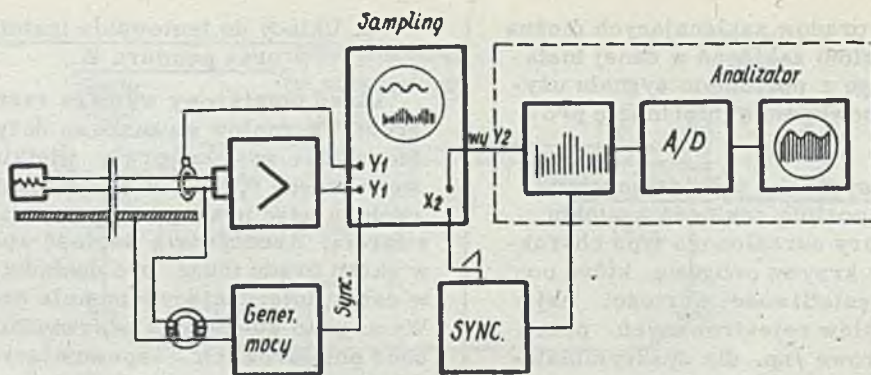
Układ pomiarowy wymaga zastosowania źródeł sygnałów stosunkowo dużych mocy. Muszą one wywołać prądy wielkiej częstotliwości rzędu 0,1 - 1 A w obwodach ekranujących, a więc pracując w warunkach bliskich zwarcia. Rzeczywista wartość wprowadzonego w ekran prądu musi być dokładnie mierzona w całym interesującym pasmie częstotliwości. Wymaga to stosowania odpowiedniej jakości sond pomiarowych - zapewniających pomiar prądów w.cz. bez włączania się w jego obwód /szczytce pomiarowe/.

Na rys. 2a przedstawiona jest zasada pomiaru wartości  $Z_T$  dla odcinka kabla koncentrycznego, na rys. 2b dla złącza wejściowego linii pomiarowej. Jako sondę do pomiaru wprowadzonego prądu zakłócającego można stosować np. sondę firmy "Solar Electronics" typu 6741-1, odznaczającą się płaską charakterystyką przenoszenia w zakresie 10 kHz - 30 MHz.

Układ ideowo prosty, przy realizacji rozbudowuje się znacznie. Wzmacniacz pomiarowy powinien odznaczać się pasmem szerszym niż przewidywany zakres częstotliwościowy pomiaru  $Z_T$ . Gdy testowane elementy są dostatecznie wysokiej jakości, wnoszony przez nie sygnał zakłócający  $V = Z_T \cdot I$  jest niewielki i powstaje problem wydzielenia go z szumu szerokopasmowego wzmacniacza. Powiększenie wartości wprowadzonego prądu powyżej kilku amperów w szerokim zakresie częstotliwości natrafia na trudności realizacyjne, z drugiej zaś strony jest niewygodne przy testowaniu instalacji w obiekcie, ze względu na zakłócenia wywoływane w innych układach pomiarowych.

W związku z tym pomiar wartości  $Z_T$  rzędu  $10^{-6}$  ohm, wymaga zastosowania specjalnej techniki pomiarowej. Dla wyodrębnienia sygnału z tła szumów stosuje się specjalne metody filtracji polegające na wydłużeniu czasu gromadzenia informacji użytecznej przy jednoczesnym całkowaniu szumu. Wykorzystuje się na ogół oscyloskop z przemianą /sampling/ do przenoszenia pomiaru w dziedzinę niskich częstotliwości, kosztem powiększenia ilości okresowych przebiegów sygnału wymaganych dla wytworzenia obrazu /napięcia/ wyjściowego. Przykładowo przebieg /impuls, sinusoida/ reprezentowany na zwykłym oscyloskopie przy podstawie czasu 1  $\mu$ s/cm sprowadza się do przebiegu odtwarzanego z odchyleniem 10 ms/cm. Po wzmacniaczu niskiej częstotliwości oscyloskopu można wprowadzić dodatkowe całkowanie. W rezultacie uzyskuje się poprawę stosunku sygnał/szum rzędu 30 - 50 dB [2].

Pomiar może być przeprowadzany w dziedzinie czasowej /skokiem/ lub częstotliwościowej /sygnałem sinusoidalnym/. W przypadku badania instalacji w obiekcie, np. reaktorze elektrowni, przeprowadza się najpierw pomiar



Rys. 4. Pomiar niskiej wartości  $Z_T$ . Filtracja sygnału z szumów w oscyloskopie z przemianą i zapis w analizatorze czasowym

w dziedzinie czasowej. Z oscylacyjnej na ogół odpowiedzi na sygnał skokowy ocenia się orientacyjnie częstotliwość własnego rezonansu instalacji, a następnie przeprowadza się pomiar odporności zakłóceńowej dla częstotliwości rezonansowej - dostrajając generator sygnału sinusoidalnego dla otrzymania maksimum poziomu na wyjścia wzmacniacza pomiarowego.

W przypadku bardzo niskich wartości sygnału zakłócającego np. przy pomiarze krótkich odcinków kabla wysokiej jakości konieczna jest dalsza modyfikacja układu, dla bardziej efektywnego wyodrębnienia sygnału z szumów. Wyjściowy przebieg po wzmacniaczu małej częstotliwości oscyloskopu samplingowego poddaje się kluczowaniu i zapisuje w wielokanałowym analizatorze czasowym /rys. 4/. W analizatorze zapisuje się do kilkudziesięciu tysięcy przebiegów "zaszumionych" przy zachowaniu synchronizacji ze źródłem sygnału testowego. Na ekranie lub w pamięci uzyskuje się synchroniczne nałożenie okresowego sygnału mierzonego i stochastyczne nałożenie zawartości szumowej. Sposób ten umożliwia przeprowadzenie pomiarów  $Z_T$  wartości rzędu  $10^{-7}$  ohm przy poziomach wprowadzanych w ekran prądów zakłócających rzędu 1A.

Alternatywną metodą pomiaru bardzo niskich wartości  $Z_T$  jest zastosowanie filtracji wąskopasmowej np. przy użyciu analizatora częstotliwości z generatorem śledzącym. Są to urządzenia oparte na syntezie częstotliwości o dużym stopniu skomplikowania i bardzo wysokiej cenie. Zastosowanie ich musi być uzasadnione dużą ilością wykonywanych pomiarów. Upraszczają one i przyspieszają pomiar w sposób bardzo istotny.

#### 6. Realnie spotykane wartości $Z_T$

Dla orientacji podano niektóre wyniki pomiarowe dla typowych kabli i złącz stosowanych w instalacjach. Na rys. 5 podano za [8] wykresy wartości impedancji przejściowej  $Z_T$  w funkcji częstotliwości dla 1 m. b. kilku typowych rodzajów kabla. Najniższa krzywa odpowiada "superekranowanemu" kablowi firmy "Fileca", z której materiałów katalogo-

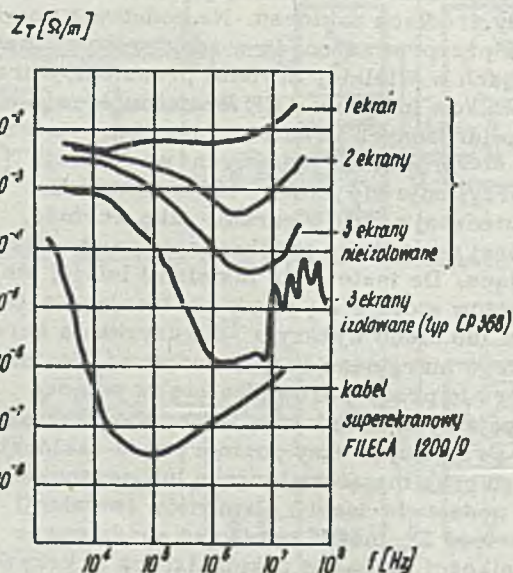
wych zaczerpnięto wykres. Z wykresu można oszacować np. iż dla 100 m kabla dwuekranowego, przy wzmacniaczu pracującym w pasmie ok. 0,1 - 10 MHz /co odpowiada zakresowi pracy impulsowych linii do pomiaru strumienia neutronowego stosujących komory rozszczepieniowe/ można spodziewać się sygnału zakłócającego odniesionego do wejścia wzmacniacza rzędu:

$$V_Z = 10^{-3} \text{ ohm/m} \cdot 100 \text{ m} \cdot 100 \text{ mA} = 10^{-2} \text{ V} = 10 \text{ mV}$$

Zakłócenia tego rzędu należy porównać z poziomem sygnału wejściowego, który wynosi ok. 0,5 mV, co od razu dyskwalifikuje typ kabla w omawianym zastosowaniu.

Zastosowanie kabla wysokiej jakości, tzw. typu "superscreened", o sandwiczowej konstrukcji ekranu, z dwoma warstwami taśmy permalloyowej pomiędzy trzema ekranami miedzianymi /F-1209/9 firmy "Fileca"/ prowadzi do wartości sygnału zakłócającego ok. 1  $\mu$ V!

Wartości  $Z_T$  dla złącz koncentrycznych wahają się od 10 m ohm dla złącz bagnetowych typu BNC 50 do ok. 10  $\mu$  ohm dla najlepszych

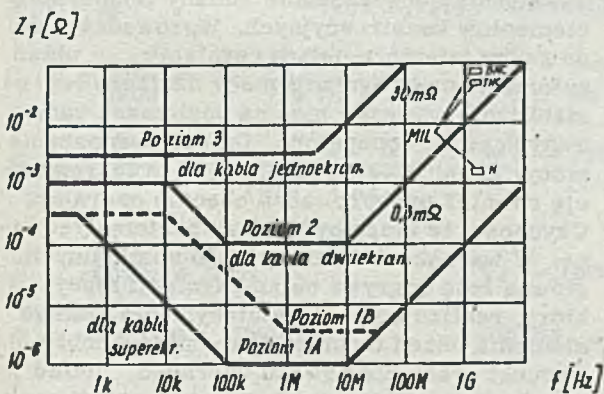


Rys. 5. Impedancja przejściowa różnych typów kabli dla 1 m./

złącz typu HN /złącze zakręcane z rozprężającą się przy skręcaniu częścią kontaktującą ekranu/. Wielkość  $Z_T$  dla złącz jest również funkcją częstotliwości. Jakość użytego złącza winna być oczywiście dostosowana do jakości kabla. Przykładowo - przy zastosowaniu na wejściu wzmacniacza złącza BNC 50 prąd zakłócający 100 mA, przebiegający przez część ekranującą złącza, wywołuje sygnał zakłócający

$$V_Z = 10^{-2} \text{ ohm} \cdot 100 \text{ mA} = 1 \text{ mV}$$

który jest znacznie większy niż sygnał wprowadzany przez 100 m kabla wysokiej jakości.



Rys. 6.

Na rys. 6 podano za [7] propozycję normy dotyczącej złącz, gdzie krzywa 1A odpowiada propozycji IEC na złącza dla kabli "superekranowanych"/wymaganie to nie jest dotychczas spełnione przez żaden z typów produkowanych seryjnie złącz/, zaś krzywe 2 i 3 odpowiadają limitom złącz dla kabli niższej jakości. Zaznaczono również limity amerykańskiej normy MILC 39012 dla złącz w zakresie mikrofalowym.

Jakość złącz, wyrażona wartości  $Z_T$ , zależy w dużej mierze od jakości połączenia z ekranem kabla, tj. technologii tzw. zaprawiania złącz. W przypadku złącz zakręcanych wartość  $Z_T$  zależy też od siły dokręcenia, a w przypadku złącz bagnetowych może zależeć od tak przypadkowego czynnika jak np. przegięcie /przechylenie/ złącza na gnieździe pod wpływem ciężaru kabla. Fakty te wskazują na konieczność przeprowadzania

testu odporności instalacji na zakłócenia po jej całkowitym wykonaniu dla potwierdzenia prawidłowości montażu.

Przedstawione podejście oraz metody pomiarowe opracowane zostały przez grupę specjalistów z Control and Instrumentation Division AEE Winfrith w Wielkiej Brytanii oraz przez grupę z Services Electroniques de Saclay, Centre d' Etudes Nucléaires de Saclay, gdzie autor komunikatu przebywał na kilkumiesięcznym stażu.

#### Literatura

- [1] I. Wilson - Susceptibility testing on instrumentation installations. Proc. IEEE EUROCON Conf. 1971/Proceedings NPPCI/I&C/P7, Winfrith 1972.
- [2] E. P. Fowler - On the interference immunity of co-axial cables Proc. IEEE EUROCON Conf. 1971/Proc. NPPCI/I&C/P6, Winfrith 1972.
- [3] E. P. Fowler, A. E. Cox - The practical application of electrical interference testing methods. Proc. NPPCI/I&C/p12, Winfrith 1972.
- [4] J. Buisson - Etude sur la susceptibilité aux parasites des ensembles de mesures nucléaires a impulsion. Proc. IAEA/SM - 168/D7, IAEA Symposium on Nuclear Power Plant Control and Instrumentation Prague 1973.
- [5] E. P. Fowler, B. V. Cake - Instrument systems with high interference immunity. Symposium and Techn. Exhibition on EMC, Montreux 1975.
- [6] B. V. Cake, E. P. Fowler, I. Wilson - EMC on interference immunity. Symposium and Techn. Exhibition on EMC, Montreux 1975.
- [7] E. P. Fowler - Screened coaxial connectors for high sensitivity systems - preprint Control and Instr. Div. AEE, Winfrith 1975.
- [8] Bulletin Technique d'Information N°1/3 S-te FILECA FRANCE.
- [9] I. Buisson, J. C. Lecompte - Informacje własne, uzyskane w czasie stażu w Centre d' Etudes Nucléaires, Saclay, Francja.

dr inż. JANUSZ POLLAK

mgr inż. TADEUSZ TOMCZAK

Instytut Automatyki Systemów Energetycznych

Wrocław

## UKŁADY REGULACJI

### ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM WWER-440

#### Zasady regulacji bloku z reaktorem WWER-440

Celem komunikatu jest przedstawienie zasad automatycznej regulacji elektrowni z reaktorem WWER-440, stosowanych obecnie przez projektantów radzieckich i omówienie używanej do tego celu aparatury. Fragmentaryczność danych źródłowych pozwala na podanie jedynie najbardziej ogólnych informacji.

Omówione już w innych referatach korzystne własności dynamiczne elektrowni z reaktorem WWER /PWR/ powodują, że przy zmianie obciążenia turbiny moc reaktora dostosowuje się do tej zmiany, ale dochodzi przy tym do nadmiernych uchybów parametrów czynników pierwotnego i wtórnego obiegu. Co do dopuszczalnych zmian mocy reaktora, obowiązują alternatywnie jedno z następujących:

1/ efektywność prętów sterujących służących do automatycznej regulacji powinna być mniejsza od udziału neutronów opóźnionych ( $\beta_{\text{ar}} < \beta$ )

2/  $\beta_{\text{ar}} < \beta$ , to prędkość przemieszczenia prętów powinna być taka, aby reaktywność równa  $\beta$  była wprowadzana równomiernie w czasie nie krótszym od  $20 s \left( \frac{d\beta_{\text{ar}}}{dt} \right)_{\text{max}} < \frac{\beta}{20} \frac{1}{s}$ .

Według danych ofertowych elektrowni WWER-440 maksymalna prędkość przemieszczenia prętów wynosi  $2 \text{ cm/s}$ , zaś dopuszczalne prędkości zmian obciążeń ze strony reaktora  $3\%/s$ , a ze strony turbiny /turbiny  $2 \times 220 \text{ MW}$  produkcji radzieckiej/ w nominalnym zakresie mocy -  $5 \text{ MW/min}$ . Pomimo tych ograniczeń, blok może brać udział w regulacji mocy i częstotliwości. Jego układy regulacji przystosowane są do likwidowania zakłóceń występujących w takich warunkach pracy. Układy te pracują poprawnie od ok. 50 do 100% mocy nominalnej.

W elektrowniach jądrowych niezależnie od typu reaktora, nie stosuje się automatycznej regulacji do mocy  $3 \pm 10\%$  wartości mocy nominalnej. Wszystkie czynności wykonuje ręcznie operator. W okresie tym występuje przede wszystkim ograniczenie dopuszczalnych zmian strumienia neutronów. Poczynając od  $3 \pm 10\%$  mocy nominalnej, należy już

uwzględniać dopuszczalne zmiany temperatur elementów konstrukcyjnych. Wprowadza się do ruchu niektóre układy regulacji; układ automatycznej regulacji mocy neutronowej stabilizuje wówczas moc na poziomach zadawanych przez operatora. Dalsze podnoszenie mocy, uruchomienie turbin i ich synchronizację również przeprowadza obecnie operator. Czynności te mogą być jednak zautomatyzowane. W warunkach zbliżonych do nominalnych, główną rolę odgrywa układ regulacji mocy, który realizuje program utrzymania stałego ciśnienia przed turbiną. Stwarza to dobre warunki pracy dla obwodu wtórnego. Układ regulacji jest stosunkowo prosty i oparty na bardziej niezawodnych czujnikach wielkości regulowanej w przeciwieństwie do stosowanego poprzednio układu regulacji według średniej temperatury czynnika pierwotnego, który nie opanowywał niektórych zakłóceń wewnętrznych przy przyjętych ograniczeniach efektywności prętów sterujących.

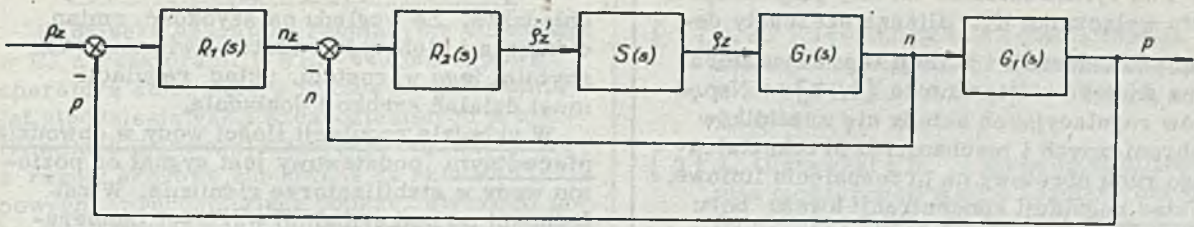
#### Struktury układów regulacji

Ze względu na różnice spełnianych funkcji, warunków pracy oraz stawianych wymagań technicznych, ogół układów dzieli się na układy regulacji procesów w warunkach normalnych oraz układy regulacji wartości granicznych. Układy regulacji wartości granicznej wchodzi do pracy tylko w warunkach procesów zakłóconych, które mogą doprowadzić do awarii bloku.

Do układów regulacji procesów w warunkach normalnych zalicza się układy regulacji: mocy, koncentracji kwasu boru, zasilania, ciśnienia chłodziwa i ilości chłodziwa.

Układy regulacji wartości granicznych obejmują swym oddziaływaniem wielkości: ciśnienie pary /wartość maksymalna oraz minimalna/ oraz temperaturę chłodziwa po wyłączeniu.

Prócz wymienionych, blok musi posiadać jeszcze układ regulacji wychładzania /rozgrzewania/ pętli cyrkulujących oraz szereg mniej istotnych układów regulacji ciśnień, poziomów i temperatur w zbiornikach, kolektorach, kondensatorach itp. W sumie blok z reaktorem WWER-440 posiada około pięćdziesięciu układów regulacji.



$$R_1(s) = k_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad \text{-- regulator g\u0142\u00f3wny}$$

$$R_2(s) = k_{p2} \quad \text{-- regulator pomocniczy}$$

$$S(s) = \frac{k}{s} \quad \text{-- nap\u0119d pr\u0119t\u00f3w regulacyjnych}$$

$$G_2(s) = \frac{n(s)}{z(s)} \approx \frac{30(67s+1)}{17s+1} \left[ \frac{\%}{\%} \right] \quad \text{-- zmiana strumienia neutron\u00f3w w zale\u017cnosci od reaktywno\u015bci zewn. (zmiany pozo\u0142enia pr\u0119t\u00f3w)}$$

$$G_1(s) = \frac{p(s)}{n(s)} \approx \frac{17s+1}{(67s+1)(25s+1)} \left[ \frac{\%}{\%} \right] \quad \text{-- zmiana ci\u015bnienia pary w zale\u017cnosci od zmiany strumienia neutron\u00f3w}$$

$p$  -- ci\u015bnienie pary

$z$  -- reaktywno\u015b\u0107 zewn\u0119trzna

$n$  -- strumie\u0144 neutron\u00f3w

indeks  $z$  -- warto\u015b\u0107 zadana

Rys. 1. Struktura uk\u0142adu regulacji mocy bloku z WWR-440

Na dok\u0142adniejsze om\u00f3wienie zas\u0142uguje uk\u0142ad regulacji mocy bloku. Odgrywa on najwa\u017aniejsz\u0105 rol\u0119 w\u0142\u00f3d uk\u0142ad\u00f3w regulacji, a rozwi\u0105zany jest w spos\u00f3b niekonwencjonalny pod wzgl\u0119dem strukturalnym i aparaturowym. Obecnie w uk\u0142adzie tym zastosowany jest specjalnie opracowany regulator ci\u0105g\u0142y typu ARM. Rys. 1. przedstawia uproszczon\u0105 i przekszta\u0142con\u0105 struktur\u0119 uk\u0142adu regulacji. Jak wynika z rys. 1, jest to uk\u0142ad kaskadowy, w kt\u00f3rym regulator pomocniczy  $R_2/s/$  jest regulatorem mocy neutronowej, za\u015b dzia\u0142aj\u0105cy na jego warto\u015b\u0107 zadana regulator g\u0142\u00f3wny  $R_1/s/$  - regulatorem ci\u015bnienia. Sygna\u0142 wyj\u015bciowy steruje si\u0142ownikiem nap\u0119du pr\u0119t\u00f3w regulacyjnych. Na rys. 1 podano transmitancje poszczeg\u00f3lnych cz\u0142on\u00f3w uk\u0142adu regulacji. Transmitancje dotycz\u0105ce obiektu pochodz\u0105 z opracowa\u0144 IASE. Przedstawiona struktura zapewnia likwidowanie wp\u0142ywu zak\u0142\u00f3ce\u0144 zewn\u0119trznych, typowych dla pracy bloku w uk\u0142adzie regulacji mocy i cz\u0119stotliwo\u015bci oraz opanowywanie zak\u0142\u00f3ce\u0144 wewn\u0119trznych /wy\u0142\u0105czenie turbiny, awaria g\u0142\u00f3wnych pomp cyrkulacyjnych, niezamierzone przemieszczenie pr\u0119t\u00f3w regulacyjnych/.

Na rys. 2. pokazano schemat regulatora ARM. Regulator sk\u0142ada si\u0119 z nast\u0119puj\u0105cych g\u0142\u00f3wnych element\u00f3w: czterech wzmacniaczy operacyjnych  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ , przerzutnik\u00f3w T i T oraz cz\u0142onu kszta\u0142owania warto\u015bci

zadanej ci\u015bnienia W. Wzmacniacz  $Y_4$ , maj\u0105cy logarytmiczn\u0105 charakterystyk\u0119 statyczn\u0105, koryguje wp\u0142yw zmiennego wzmocnienia obiektu, kt\u00f3re zale\u017cy od poziomu mocy. Wzmacniacze  $Y_1$  i  $Y_2$  s\u0105 sumatorami, za\u015b  $Y_3$  jest cz\u0142onem ca\u0142kuj\u0105cym, na wyj\u015bciu kt\u00f3rego pojawia si\u0119 sygna\u0142 proporcjonalny do mocy zadanej.

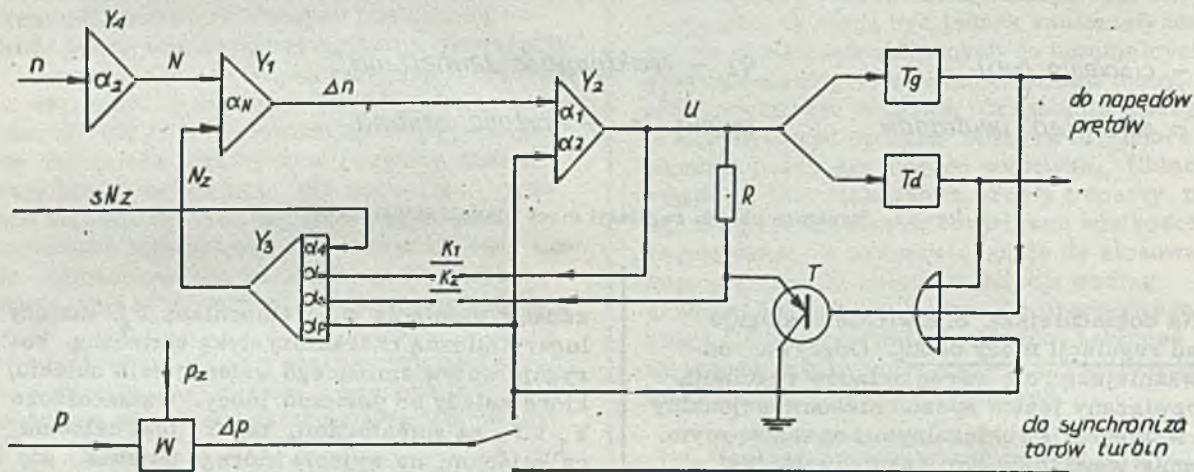
Uchyb mocy neutronowej wzmocniony do warto\u015bci U, powoduje ruch pr\u0119t\u00f3w regulacyjnych po zadzia\u0142aniu odpowiedniego przerzutnika. Uchyb ci\u015bnienia  $\Delta P$  zmienia warto\u015b\u0107 zadana\u0144 mocy neutronowej i dzia\u0142a bezpo\u015brednio na pr\u0119ty regulacyjne przez przerzutniki. Uk\u0142ad logiczny, rezystancja R i tranzystor T powoduj\u0105, \u017ce przy U ni\u017cszym od progu zadzia\u0142ania przerzutnik\u00f3w wyst\u0119puje w uk\u0142adzie silne sprz\u0119\u017cenie zwrotne z wyj\u015bcia  $Y_2$  przez R i  $K_2$ . Umo\u017cliwia to automatyczn\u0105 kompensacj\u0119 dryftu element\u00f3w regulatora i kom\u00f3r jonizacyjnych. Przy wzro\u015bcie uchyb\u00f3w /wzro\u015bcie U/ sprz\u0119\u017cenie to zanika / $\alpha s = 0/$  i regulator realizuje algorytm:

$$U(s) = \frac{\Delta n(s)}{s} d_1 d_2 d_3 - \Delta P(s) d_4 d_5 d_6 \frac{1 + \frac{d_7}{s}}{s}$$

Wy\u0142\u0105cznik  $K_1$  s\u0142u\u017cy do prze\u0142\u0105czenia regulatora do stanu gor\u0105cej rezerwy /po za\u0142\u0105czeniu  $K_1/$ . Regulator ARM sk\u0142ada si\u0119 bowiem z dw\u00f3ch niezale\u017cn\u0119ch uk\u0142ad\u00f3w prze\u0142\u0105czalnych automatycznie. Regulator umo\u017cliwia r\u00f3wnie\u017c opanowywanie sytuacji awaryjnych. Np. po wpad\u0144eniu p\u0119tli cyrkulacyjnej powoduje obni\u017cenie mocy reaktora /sygna\u0142 impulsowy

$sN_3$  / i na synchronizator turbiny po przełączeniu wyłącznika  $K_3$ . Bliższe szczegóły dotyczące konstrukcji i funkcji tego regulatora można znaleźć w literaturze [1, 2]. Napęd prętów regulacyjnych składa się z silników synchronicznych i mechanizmu przekształcającego ruch obrotowy na przesunięcia liniowe.

Układ regulacji koncentracji kwasu boru w chłodziwie ma za zadanie kompensację powolnych zmian reaktywności, wynikających z wypalenia paliwa czy zatrucia reaktora. Kompensacja tych zjawisk przeprowadzona przy pomocy prętów powodowałaby zmniejszenie zakresu ich regulacyjności. Koncentrację boru w chłodziwie mierzy się za pomocą specjalnego miernika. Organami wykonawczymi regulacji są zawory roztworu kwasu boru po stronie ssącej pomp dostarczających chłodziwo do obwodu /normalnych lub awaryjnych/ oraz zawory kierujące chłodziwo do filtrów odciągających kwas boru.



Rys. 2. Struktura regulatora mocy ARM

Układ regulacji zasilania wytwornic pracuje na sygnale proporcjonalnym do poziomu wody. Oddziaływania na przepływ wody zasilającej korygowane są w zależności od bezwzględnej wartości tego przepływu oraz od obciążenia wytwornicy /przepływu pary/. Ze względu na możliwość nierównomiernych obciążeń, każda z sześciu wytwornic ma odrębny układ regulacji.

Układ regulacji ciśnienia chłodziwa ma za zadanie utrzymanie ciśnienia poniżej krytycznego, odpowiadającego punktowi wrzenia. Wykorzystany jest tu stabilizator ciśnienia, do którego wprowadzone są grzałki, urządzenia wtryskowe oraz zawory zrzutowe. Układ regulacji pracuje na podstawie odchyłki ciśnienia rzeczywistego, mierzonego w jednej z pętli chłodzących, od wartości zadanej. W zależności od kierunku zmiany oddziałuje na grzałki lub na urządzenie wtryskowe. Niezależnie od układu regulacji, przy wyższych

ciśnieniach działają zawory zrzutowe pary chłodziwa. Ze względu na szybkość zmian ciśnienia i niebezpieczeństwo związane ze zbytnim jego wzrostem, układ regulacji musi działać szybko i dokładnie.

W układzie regulacji ilości wody w obwodzie pierwotnym podstawowy jest sygnał od poziomu wody w stabilizatorze ciśnienia. W zależności od maksymalnej wartości temperatury w jednej z pętli chłodzących oddziaływanie układu regulacji jest korygowane. Elementami wykonawczymi układu są zawory zmieniające wydajność zasilania lub upustu chłodziwa.

Z głównym układem regulacji turbiny współpracują dwa układy - regulacji maksymalnego i minimalnego ciśnienia pary świeżej. Zadaniem układu ciśnienia minimalnego jest dostosowywanie mocy turbiny do mocy reaktora w przypadku wypadnięcia pętli cyrkulacyjnej lub spadku ciśnienia pary po zadziałaniu

zabezpieczeń reaktora. Sygnały wyjściowe wpływają ograniczająco na otwarcie zaworu turbiny, a więc podtrzymują minimalną wartość ciśnienia. Sygnały te wzmacniane są proporcjonalnie do obciążenia bloku reprezentowanego przez sumę ciśnień za pierwszym stopniem obu turbin. W ten sposób wartość utrzymywanego ciśnienia spada wraz ze spadkiem obciążenia bloku. Regulator oddziałuje pośrednio na siłowniki zaworów przez urządzenie synchronizujące, dostosowujące sterowanie do obciążenia turbin. Układ regulacji maksymalnej wartości ciśnienia pracuje także w stanach zakłóconych. Wspomaga on likwidację skutków dużych zakłóceń /zmian obciążenia/, np. wypadnięcia turbiny. Zadziałanie układu oraz regulacja odbywają się na podstawie zmian ciśnienia w kolektorze pary. Para jest zrzucana do kondensatorów, przy czym jej strumienie synchronizowane są w zależności od warunków panujących w kondensatorach.

### Aparatura regulacji automatycznej

Radziecka aparatura regulacyjna stosowana w EJ z reaktorami WWER-440 jest typową aparaturą stosowaną w Polsce na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych w elektrowniach konwencjonalnych. Regulatory są z reguły krokowe zbudowane na układach lampowych, uruchamiające poprzez styczniki siłowniki stałoprędkościowe z silnikiem trójfazowym. Współpracują one w większości z przetwornikami indukcyjnymi lub bezpośrednio z termoelementami, bez przetwarzania ich sygnałów na sygnały prądowe. Siłownikami są z reguły silniki trójfazowe o momentach od 25 + 100 kGm oraz nieliczne duże /400 kGm/. Wyposażone w indukcyjne nadajniki do sprzężeń zwrotnych. W ważnych układach regulacji nie stosuje się powszechnie redundancji pomiarów czy redundancji drugiego rzędu. Wyjątek stanowi regulator mocy ARM, wyposażony w układ wyboru.

Rozważa się możliwość zastosowania w układach regulacji aparatury elektrycznej automatyki analogowej INTELEKTRAN wchodzącej w skład systemu POLMATIK. Jest to modułowa wersja systemu URS. Aparatura ta umożliwia realizację części centralnych wszystkich układów regulacji EJ z WWER-440.

### Literatura

- [ 1 ] B. A. Kuwszinnikow - Awtomatizacija atomnych reaktorow i elektrostancji w SSSR. Publ. LAEA - PL - 431/4, s. 69-86.
- [ 2 ] J. Olszewski i in. - Sistema regulowania moszczności AES s regulatorom ARM. Sympozjum SEW, Budapeszt 1969
- [ 3 ] J. Pollak, A. Nawrocki - Sprawozdanie z wyjazdu do Bułgarii /AEC - Atomnaja Elektro-Centrala Kozłoduj/- IASE, Wrocław, 1974 r.
- [ 4 ] Oferta na budowę elektrowni jądrowej z dwoma blokami o mocy 400 MW każdy - Energoprojekt, Warszawa, 1971 /tłumaczenie/.
- [ 5 ] DOCKET 50280-19/1970/ - Surry Power Station
- [ 6 ] DOCKET 50335-2/1970/ - Rancho Seco Power Station
- [ 7 ] A. Gos i in. - Opracowanie wymagań dla aparatury regulacyjnej i pomiarów ciepłych elektrowni jądrowych. IASE, Wrocław, 1972, oprac. niepubl.
- [ 8 ] W. Aleite - Regelung des Kernkraftwerks VGB - Kernkraftwerks - Seminar, 1970.

**mgr inż. ZYGMUNT JAKUBOWSKI**

**mgr inż. TADEUSZ TOMCZAK**

Instytut Automatyki Systemów Energetycznych

Wrocław

## SYSTEM STEROWANIA BINARNEGO ELEKTROWNI Z REAKTORAMI WWER-440

Zakłada się, że sterowanie procesami rozruchu i odstawiania wybranych układów technologicznych bloku z reaktorem WWER-440 będzie zautomatyzowane. Ma to na celu podwyższenie bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloku, oraz ułatwienie pracy personelu. Układy sterowania tymi procesami, zwane dalej automatami sterowania binarnego /ASB/, będą spełniały funkcje decyzyjne, automatycznego sterowania sekwencyjnego, nadzoru, informacyjne oraz samokontroli. Muszą również umożliwiać oddziaływania ręczne oraz systemu zabezpieczeń na podporządkowane układy technologiczne, a także testowanie aparatury i obiektu. W Instytucie Automatyki Systemów Energetycznych opracowano koncepcję automatyzacji blo-

ku jądrowego, w której do syntezy automatów przewiduje się zastosowanie stałoprogramowej aparatury systemu MASTER, opracowanej i produkowanej w Centrum Naukowo-Produkcyjnym Automatyki Energetycznej.

### Struktura

Ze względu na przejrzystość podziału funkcji, łatwość algorytmizacji oraz możliwość automatyzacji etapowej /rozszerzenie funkcji/, sterowanie binarne bazować będzie na podziale układu technologicznego bloku na jednostki funkcjonalne. Podział ten ma charakter hierarchiczny i w związku z tym w podobny sposób dzielą się procesy sterowane i funkcje automatów.

Analiza procesów bloku WWER-440 prowadzi do podziału jego układu na następujące rodzaje jednostek funkcjonalnych: obwód, grupa, zespół, urządzenie wykonawcze.

Automatyka będzie rozkładała swoje funkcje na odpowiadające tym rodzajom jednostek poziomy sterowania. W przypadku automatyzacji częściowej, funkcje przypisywane wyższym poziomom sterowania spełniać musi personel.

Zabezpieczenia i blokady związane z daną jednostką funkcjonalną zgrupowane będą w jej automacie sterującym. Prowadzą one kontrolę prawidłowości sterowania względem stanu obiektu, dopuszczając realizację rozkazów z wyższych poziomów, badają spełnienie koniecznych warunków sterowania, inicjują przechodzenie na awaryjne programy sterowania itp.

Koordinacja pracy automatów tego samego poziomu należy do automatów nadrzędnych lub do personelu, a także może być realizowana za pośrednictwem m. in. poziomych sprzężeń między tymi automatami przez ich blokady.

Zakłada się, że sterowanie ręczne obejmie napędy i urządzenia dwustanowe niezbędne do zdalnego oddziaływania na procesy wszystkich jednostek funkcjonalnych. W przypadkach jednostek podlegających ASB, ręczne sterowanie będzie rozszerzone o oddziaływania z zakresu komunikacji z automatami zespołów i grup. W sterowaniu indywidualnym będzie zawsze pośredniczył poziom sterowania urządzeniami wykonawczymi, w związku z czym będzie ono podlegało blokadom tego poziomu. W zasadzie rozkazy ręczne będą miały priorytet przed automatycznymi z wyższych poziomów sterowania, choć w pewnych przypadkach wprowadzone będzie warunkowanie ich przez system zabezpieczeń.

Przy sterowaniu procesami mieszanymi /binarnymi i ciągłymi/ automaty będą współpracować z układami regulacji, normalnymi lub specjalizowanymi dla rozruchów i odstawiń. Spełniać więc będą wówczas nadrzędną rolę w stosunku do układów regulacji.

System sterowania binarnego będzie tworzony z zachowaniem możliwości sukcesywnej rozbudowy w sensie jakościowym /w pionie/ i ilościowym /w poziomie/.

#### Podział funkcji

Na poziomie sterowania urządzeniami wykonawczymi zgromadzone będą automaty sterowania napędami /ASN/, grupujące układy sterowania indywidualnego napędów według ich przynależności do technologicznych zespołów. Zadania ASN są następujące:

- wytwarzanie sygnałów sterowania urządzeniami wykonawczymi przy oddziaływaniach ręcznych, automatycznych z: wyższych poziomów sterowania oraz od blokad i zabezpieczeń;
- realizacja funkcji zabezpieczających /blokad/ dla urządzeń zespołu technologicznego;
- formowanie sygnałów informacyjnych o stanach napędów, niesprawnościach itp.

Podstawową część sterowania sekwencyjnego zespołami technologicznymi realizują automaty sterowania zespołem /ASZ/. Każdy ASZ współpracuje z jednym lub z kilkoma /maksymalnie z trzema/ ASN - w przypadku przemiennego sterowania zwielokrotnionymi zespołami. Głównymi funkcjami ASZ są:

- generowanie sygnałów sterujących dla podporządkowanego ASN na podstawie programu /algorytmu/ i stanu zespołu;
- tworzenie sygnałów zezwoleń na działania sterownicze, badanie warunków startowych i przebiegu sterowania /blokad zespołu/;
- przerywanie sterowania i porządkowanie jednostki w przypadkach niesprawności;
- formowanie informacji o stanach sterowanego zespołu;
- kontrola realizacji programu sterowania i sprawności torów sygnałów.

W zakresie oddziaływania na układy regulacji ASZ umożliwiają załączanie lub wyłączanie z pracy układów regulacji, a także oddziaływanie na podporządkowane im elementy wykonawcze /za pośrednictwem ASN/. Automaty sterowania zespołem mogą również pełnić rolę doradcą dla operatora bloku /praca przy odciętych wyjściach rozkazów na obiekt/; sposób ten może być wykorzystywany przy awariach uniemożliwiających realizację sterowania automatycznego.

Funkcje sterowania grupami funkcjonalnymi realizują automaty sterowania grupą /ASG/. Kontrolują one stan podporządkowanych grup, analizują stan bloku i na tej podstawie podejmują decyzje o zmianach zestawu /stanu/ grupy. Dokonują wyboru zespołów, programów sterowania oraz inicjują pracę automatyczną ASZ. W stanach awaryjnych zadaniem ich jest doprowadzać grupę do stanu bezpiecznego, wprowadzać do pracy zespoły rezerwowe. Pracę ASG inicjuje personel lub system zabezpieczeń.

Do celów współpracy operatora z systemem służy aparatura pulpituowa. Umożliwia ona komunikację z automatami sterowania grupami, zespołami i urządzeniami wykonawczymi w zakresie:

- przełączania na sterowanie automatyczne lub ręczne;
- wyboru programów, inicjowania i przerywania ich realizacji;
- wyboru jednostek funkcjonalnych do sterowania;
- testowania;
- sterowania zabezpieczającego czy porządkującego jednostkę;
- sterowania urządzeniami wykonawczymi;
- informowania o stanie obiektu, przebiegu procesu, o niesprawnościach obiektu czy aparatury.

W zakresie sterowania napędami aparatura pulpituowa systemu MASTER umożliwia sterowanie indywidualne lub wybiórcze. Dla części informacyjnej aparatury obowiązywać będzie zasada, że przy normalnej pracy informacja



będzie zagęszczona i ograniczona; szeroka i dokładna musi być przy zakłóceniach lub na życzenie.

Dla testowania obiektu, głównie dla awaryjnych jednostek technologicznych przewiduje się specjalne algorytmy powodujące zmiany stanów wszystkich ważnych urządzeń i wykorzystujące sygnały ważnych czujników, nie powodujące jednak wprowadzenia do pracy testowanej jednostki. Testowanie automatów z kolei będzie polegać na symulowaniu sygnałów z obiektu i kontrolnej realizacji programów sterowania czy blokad.

### Charakterystyka techniczna systemu MASTER

System MASTER jest systemem aparatury opartym na powtarzalnych elementach podstawowych /modułach/. Wprowadza to znaczne ułatwienie projektowania i serwisu oraz obniżenie kosztów produkcji. Umożliwia również dowolny wybór i rozszerzanie zakresu funkcji systemu.

Mimo że MASTER jest systemem programowanym za pomocą połączeń przewodowych, zastosowanie programujących matryc diodowych daje możliwość stosunkowo łatwych zmian algorytmów sterowania. Moduły funkcjonalne wykonane są w technice obwodów scalonych TTL. Istnieją następujące rodziny modułów:

- moduły separacyjne wejść dwustanowych,
- moduły wejściowe sygnałów analogowych,
- moduły pośredniczące,
- moduły funkcjonalne logiczne,
- moduły wyjść sterujących,
- moduły zasilania,
- aparatura pulpituowa.

Do przesyłania sygnałów binarnych między obiektem a układami wejściowymi automatów możliwe jest zastosowanie trzech rodzajów napięć 60 V-, 220 V- lub 220 V $\sqrt{2}$ . Sygnały analogowe mogą być:

- zmiennoprądowe 0  $\pm$  1 A, 0  $\pm$  5 A,
- stałoprądowe 0  $\pm$  5 mA, 0  $\pm$  20 mA, 4  $\pm$  20 mA, 1  $\pm$  5 mA,
- stałonapięciowe 0  $\pm$  10 V, 2  $\pm$  10 V.

Wszystkie sygnały z obiektu podawane są do listew montażowych umieszczonych w oddzielnej szafie. Na listwach montowane są elementy separacji i kontroli wejść dwustanowych. Sygnały wejściowe wydawane są w postaci wolnych zestyków przelączalnych.

Zapewnieniu wysokiej niezawodności i odporności na ciężkie warunki pracy mają służyć specjalne rozwiązania, jakimi będzie charakteryzował się system. Polegają one m. in. na: wykorzystaniu sygnałów z redundancją oraz sygnałów komplementarnych, rozdzielaniu aparatury w sensie przestrzennym, zasilania, źródeł sygnałów itp., stosowaniu zdecentralizowanego systemu połączeń krosowych oraz testowaniu urządzeń sterujących i obiektu. Obecnie system posiada już

częściowo te rozwiązania, część jednak będzie dopracowana w trakcie prac modernizacyjnych.

### Zakres automatyzacji bloku z reaktorem WWER-440

Rys. 1 przedstawia wstępną specyfikację automatów sterowania binarnego i ilustruje ogólnie charakter i strukturę systemu. Ostateczna struktura może być ustalona dopiero w trakcie prac projektowych.

Autorzy zakładają, że automatyzacja nie będzie obejmować wyższych poziomów, takich jak np. poziom sterowania grupą, choć możliwe będą pojedyncze sprzężenia koordynacyjne przebiegające wyżej. Przeprowadzone w IASE analizy procesów bloku wykazują celowość zautomatyzowania około 10 grup funkcjonalnych i przynależnych im, lub samodzielnych około 70 zespołów. Liczby te nie odpowiadają ilości automatów sterowania binarnego, jakie posiadałby blok przy takich założeniach. Z jednej strony istnieje możliwość przemiennego sterowania zwielokrotnionymi jednostkami przez pojedyncze automaty, z drugiej zaś potrzeba rezerwowania funkcji sterowniczych automatów. Dość znaczna ilość wytypowanych jednostek wynika z silnego rozbudowania układu technologicznego, jakim charakteryzuje się blok z reaktorem WWER-440. Należy również wziąć pod uwagę zagraniczne doświadczenia z eksploatacji takich systemów; wykazują one celowość całkowitej automatyzacji poszczególnych jednostek, gdyż tylko wtedy można zapewnić rzeczywiste odciążenie personelu.

Główny nacisk położono na te funkcje automatów, które związane są z udziałem w zapobieganiu czy ograniczaniu skutków awarii. Awarie elektrowni jądrowych mogą okazać się bardzo groźne, głównie w związku z możliwością wydostania się skażonych czynników czy produktów rozszczepiania. W sytuacjach takich trzeba lokalizować wydostające się chłodziwo czy powietrze, odcinać nieszczelne gałęzie, uzupełniać stan chłodziwa w obwodzie, wychładzać obwód lub szczególnie pętle, zalewać reaktor kwasem boru, obniżać ciśnienie w pomieszczeniach szczelnych, uruchamiać agregaty awaryjnego zasilania elektrycznego itp. Przeprowadzanie tych procesów gwarantują awaryjne jednostki funkcjonalne, jakie posiada blok. Ważna jest ich ciągła sprawność, możliwość szybkiego wprowadzenia do pracy, a także możliwość stosowania specjalnych środków zaradczych w przypadku ich niesprawności /wykorzystanie rezerwowania jednostek/. Automaty sterowania binarnego są w stanie spełniać wymienione wyżej warunki i z tego względu do automatyzacji typuje się głównie jednostki o funkcjach awaryjnych. Ważnym efektem automatyzacji tych jednostek jest znaczne odciążenie personelu w niebezpiecznych stanach bloku. Z automatów tego rodzaju w bloku z reaktorem WWER-

440 przewidziane są automaty sterujące grupami zasilania wodą obwodu pierwotnego, zasilania kwasem boru, wychładzania powyłężeniowego, zasilania elektrycznego /agregaty Diesla/ oraz kilka automatów sterowania zespołami w innych grupach.

Ze względu na częstotliwość przeprowadzania procesów, wynikającą z możliwości pracy bloku przy niepełnym zestawie urządzeń lub wymuszonej przez system energetyczny, do automatyzacji wytypowano następujące jednostki: pętle cyrkulacyjne z pompami, ich wychładzaniem względnie rozgrzewaniem, turbinę itp.

Duże skomplikowanie procesów rozruchowych wynikające z rozbudowania układu, czy z konieczności dokładnego sterowania występuje w wielu jednostkach. Często dochodzi tutaj konieczność realizacji złożonych algorytmów blokad. Do takich należą pokazane na rysunku układy: zasilania obwodu wtórnego, kondensatu, oczyszczania chłodziwa i stabilizacji ciśnienia.

Przy ustalaniu struktury systemu sterowania binarnego kierowano się dodatkowo możliwościami skrócenia procesów w wyniku automatyzacji sterowania nimi, a także znaczeniem poszczególnych jednostek dla gwarancji ciągłości pracy całości bloku; jest to ważne, gdy składowe tych jednostek rezerwują swoje funkcje, są zwielokrotnione.

#### Literatura

[1] D. Engelhord i in. - Verknüpfungs- und Ablaufsteuerungen mit Simatic. Siemens-Zeitschrift, nr 5, 1973, s. 315-320

[2] L. Bartelt i in. - Freiprogrammierbares Steuersystem Simatic S3. Siemens-Zeitschrift, nr 5, 1973, s. 321-324

[3] L. M. Panis - Die Möglichkeiten der Automation in der Steuerung von Kernkraftwerken, Fachtagung, nr 6/5 - Nucler 69, Basel 1969

[4] H. J. Friedrich - Die integrierte Automation im Kraftwerk-Überblick und Tendenzen, Hartmann and Braun Dokumentation DE2, "Kraftwerksautomatisierung"

[5] K. Federkiewicz - MASTER; automat sterowania napędami - ASN; opis struktury logicznej i zalecenia dla projektantów. Oprac. IASE, 1973

[6] Z. Mikołajczyk, M. Patrzyk i in. - MASTER, katalog modułów. Cz. 1 + 3 - oprac. IASE 1975

[7] W. Handschuh, M. Jung - Erfahrungen mit automatischen Steuerungen in Wärmekraftwerken. Elektrizitätswirtschaft nr 24, 1969, s. 785-791.

[8] E. Brock - Steuerung vom Sicherheitssystemen des Kernkraftwerks Würgassen mit Geamatic 1150. Hartmann und Braun Dokumentation DE2, "Kraftwerksautomatisierung"

[9] W. Sweet, D. Conklin - The computer in BWR operations - present and future, IEEE Trans Nucl. Sci., NS-20 nr 1, Feb. 1973, s. 740-744

[10] M. Jung, R. Schmidt - Simatic - Steuersystem P für die Funktionsgruppen - automatik in Wärmekraftwerken. Siemens-Zeitschrift, Mai, 1967, s. 410-416

[11] Hamann i in. Automatisierung des Blockes 6 im Heizkraftwerk Pfaffenwald der Universität Stuttgart. VGB, Marz 1973

[12] H. Amberger - Steuerung von Diesel - Notstromanlagen in Kernkraftwerken. Siemens-Zeitschrift, Dezember 1973, s. 828-831

[13] Heining - Process computer and functional group control in the Biblis nuclear power plant. Konf. IAEA "Nuclear Power Control and Instrumentation", Wiedeń 1972.

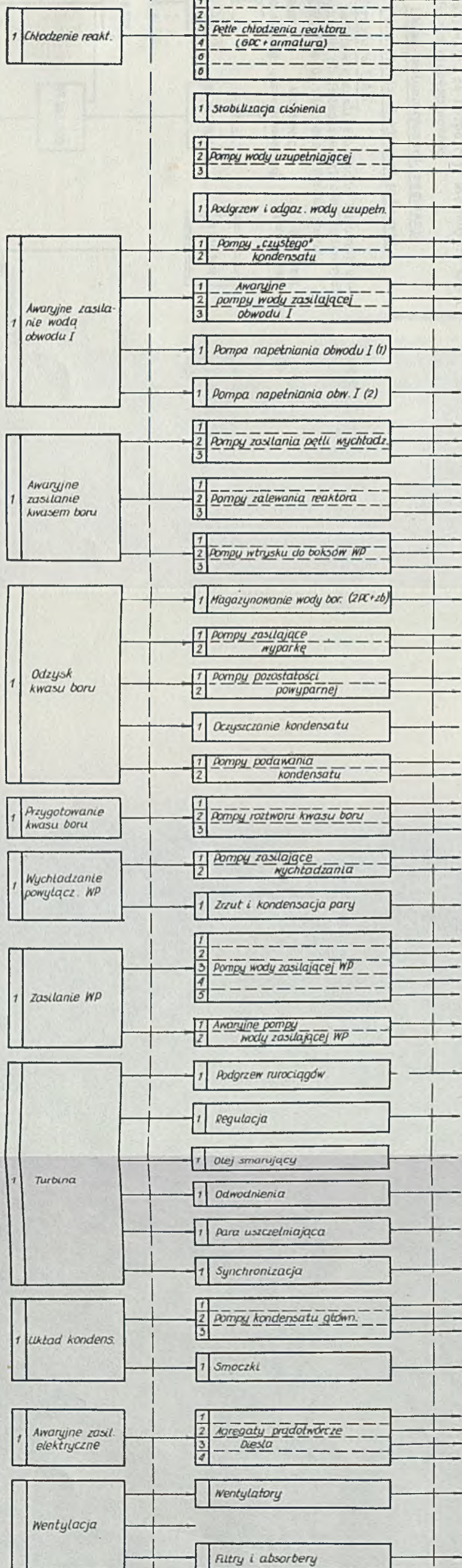
[14] T. Tomczak, Z. Jakubowski - Wymagania i założenia funkcjonalno-aparaturowe układów sterowania sekwencyjnego dla elektrowni jądrowej. IASE, 1974, oprac. niepubl.

[15] T. Tomczak i in. Koncepcja systemu sterowania binarnego elektrowni jądrowej z reaktorem WWER-440. IASE, 1975, oprac. niepubl.

Poziom sterowania grupą

Poziom sterowania zespołem

Poziom sterowania napędami



Rys.1. Wstępna specyfikacja ASB elektrowni z reaktorem WWR-440

## METODA ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW STEROWANIA ELEKTROWNI JADROWEJ

### I WYNIKI BADAŃ NIEZAWODNOŚCIOWYCH RÓŻNYCH WERSJI UKŁADÓW REGULACJI ELEKTROWNI JADROWEJ WWER-440

#### 1. Wprowadzenie

Przewidywany rozwój polskiej energetyki jądrowej spowodował konieczność podjęcia prac dotyczących m. in. optymalnego wyboru struktury układu automatycznej regulacji /UAR/ mocy cieplnej reaktora atomowego.

Celem pracy prezentowanej poniżej, było opracowanie metody umożliwiającej wybór układu automatycznej regulacji o strukturze optymalnej pod względem niezawodnościowym, przy założeniu, że rozpatruje się jedynie tzw. uszkodzenia niebezpieczne.

#### 2. Układ automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowej

##### 2.1. Struktura UAR

Na podstawie analizy układów automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowych typu WWER-440, Siemens i Westinghouse

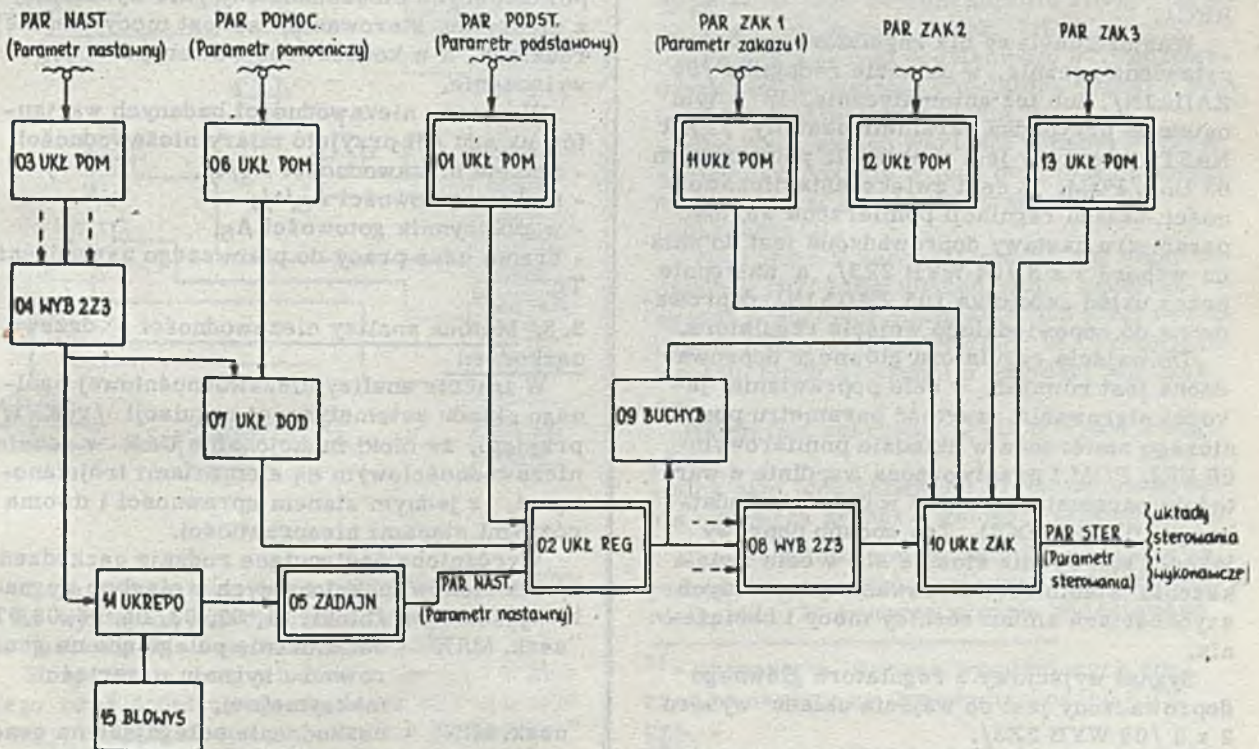
określono ogólny schemat układu regulacji obciążenia /rys. 1/, w którym dla uproszczenia pominięto:

- układy wykonawcze-zapewniające ruch prętów w rdzeniu,
- układy sterowania ręcznego,
- układy sterowania awaryjnego i rozruchowego.

Wielkościami wejściowymi UAR, reprezentującymi przebieg procesu wytwarzania energii cieplnej w reaktorze, są:

- parametr podstawowy regulacji /PAR PODST/<sup>x</sup>,
- parametr pomocniczy regulacji /PAR POMOC/ - poprawiający jakość regulacji obciążenia,

<sup>x/</sup> oznaczenia przyjęte ze względu na organizację programu wyznaczania i porównywania niezawodności RAFT



Rys. 1.

- parametr zakazu /PAR ZAK, /2,3/ - przekroczenie wartości tego parametru powoduje zablokowanie ruchu prętów w górę.

Wielkość obciążenia elektrowni określa parametr nastawy /PAR NAST/, który może być zadawany ręcznie lub automatycznie. Sygnałem wyjściowym układu regulacji jest parametr sterowania /PAR STER/, który poprzez układy sterowania i wykonawcze /pominięte w schemacie/ wpływa na przebieg procesu w reaktorze.

Poszczególne układy elektroniczne i elektryczne występujące w UAR pogrupowano w bloki funkcjonalne, oznaczone - zgodnie z potrzebami programu RAFT - ośmioznakowymi słowami. Bloki funkcjonalne, w zależności od typu elektrowni jądrowej oraz rozwiązania technicznego, mają różną budowę oraz różne parametry techniczno-eksploatacyjne.

Spśród bloków funkcjonalnych wyróżnia się te, których specjalna konstrukcja /lub realizacja określonych funkcji/, zapewnia zwiększenie niezawodności działania UAR. Wymieńmy tutaj przede wszystkim układ wyboru 2 z 3 /04 WYB 2Z3, 08 WYB 2Z3/ porównujący zgodność trzech sygnałów wejściowych. Lokalizacja układu wyboru 2 z 3 w istotny sposób wpływa z jednej strony na niezawodność działania UAR, z drugiej zaś na koszt aparatury

## 2.2. Zasada działania UAR

Parametr podstawowy regulacji /PAR PODST/ mierzony jest w układzie pomiarowym 01 UKŁ POM. Wartość parametru podstawowego z układu pomiarowego doprowadzona jest do wejścia regulatora głównego /02 UKŁ REG/.

Wartość nastawy dla regulatora może być ustawiona ręcznie, w układzie zadajnika /05 ZADAJN/, lub też automatycznie. W tym ostatnim przypadku parametr nastawy /PAR NAST/ mierzony jest w układzie pomiarowym 03 UKŁ POM. W celu zwiększenia niezawodności układu regulacji pomierzona wartość parametru nastawy doprowadzona jest do układu wyboru 2 z 3 /04 WYB 2Z3/, a następnie przez układ zadajnika /05 ZADAJN/, doprowadzona do odpowiedniego wejścia regulatora.

Do wejścia regulatora głównego doprowadzona jest również, w celu poprawienia jakości sterowania, wartość parametru pomocniczego zmierzona w układzie pomiarowym 06 UKŁ POM i przetworzona wspólnie z wartością parametru nastawy w układzie dodatkowym 07 UKŁ DOD. Ten sposób poprawy jakości sterowania stosuje się w celu zwiększenia stabilności sterowania przy dużych szybkościach zmian różnicy mocy i obciążenia.

Sygnał wyjściowy z regulatora głównego doprowadzony jest do wejścia układu wyboru 2 z 3 /08 WYB 2Z3/.

Celem zwiększenia niezawodności sterowania stosuje się tzw. blokowanie ruchu prętów

w górę, które odbywa się w układzie zakazu /10 UKŁ ZAK/, bądź w oparciu o wartości parametrów zakazu /PAR ZAK1, PAR ZAK2, PAR ZAK3/, lub w oparciu o sygnał wytworzony w układzie śledzenia wartości uchybu /09 BUCHYB/.

Adaptowanie omówionego schematu regulacji do układów automatycznej regulacji obciążenia poszczególnych elektrowni polega na pominięciu w schemacie odpowiednich bloków funkcjonalnych.

## 3. Analiza niezawodnościowa UAR

### 3.1. Cel analizy niezawodnościowej UAR

Analizę niezawodnościową UAR przeprowadza się między innymi w celu:

1. wyznaczenia wartości liczbowych wybranych miar niezawodności konkretnej struktury układu regulacji,
2. zbadania wpływu parametrów niezawodnościowych poszczególnych urządzeń na niezawodność układu regulacji,
3. zbadania wpływu struktury układu regulacji na charakterystyki niezawodnościowe UAR,
4. wyboru najlepszego /ze względu na konfigurację i parametry niezawodnościowe urządzeń/ układu automatycznej regulacji.

Adaptując znaną metodę tzw. drzewa uszkodzeń, opracowano metodę analizy niezawodnościowej układów automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowej.

### 3.2. Miary niezawodności

W analizie niezawodnościowej UAR ograniczono się do badania skutków tzw. uszkodzeń niebezpiecznych, czyli uszkodzeń prowadzących do wytworzenia sygnałów sterujących powodujących nieuzasadniony /nie wynikający z algorytmu sterowania/ wzrost mocy cieplnej reaktora, a w konsekwencji awaryjne jego wyłączenie.

Dla oceny niezawodności badanych wariantów układu AR przyjęto miary niezawodności:

- funkcja niezawodności  $R_S/t$ ,
- funkcja gotowości  $A_S/t$ ,
- współczynnik gotowości  $A_S$ ,
- średni czas pracy do pierwszego uszkodzenia  $T_S$ .

### 3.3. Metoda analizy niezawodności - drzewo uszkodzeń

W trakcie analizy niezawodnościowej ogólnego układu automatycznej regulacji /rys. 1/ przyjęto, że bloki funkcjonalne UAR w sensie niezawodnościowym są elementami trójstanowymi, z jednym stanem sprawności i dwoma różnymi stanami niesprawności.

Wyróżniono następujące rodzaje uszkodzeń: a/ dla bloków funkcjonalnych o ciągłym sygnale wyjściowym /bloki: 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07/.

- "uszk. MAX" - uszkodzenie polegające na generowaniu sygnału o wartości maksymalnej,
- "uszk. MIN" - uszkodzenie polegające na generowaniu sygnału o wartości minimalnej,

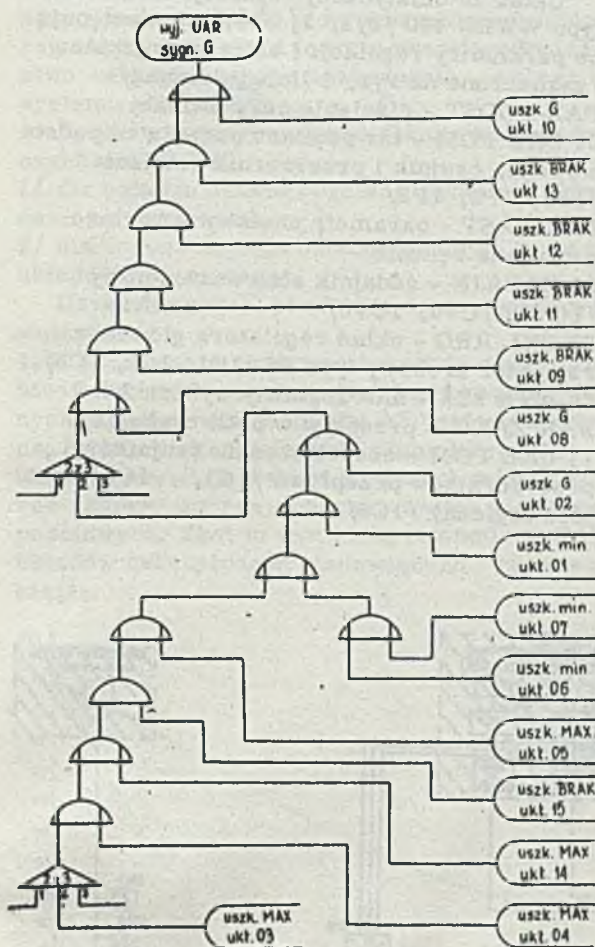
b/ dla bloków funkcjonalnych o dyskretnym sygnale wyjściowym /bloki: 02, 08/  
 "uszk. G" - uszkodzenie polegające na generowaniu sygnału powodującego wysuwanie prętów regulacyjnych z rdzenia

"uszk. D" - uszkodzenie polegające na generowaniu sygnału powodującego wsuwanie prętów do rdzenia,

c/ dla bloków funkcjonalnych pracujących w obwodach zakazu /bloki: 09, 11, 12, 13/

"uszk. BRAK" - uszkodzenie polegające na braku reakcji w postaci wygenerowania sygnału zakazu, przy podaniu na wejście bloku odpowiedniego "sygnału przekroczenia"

"uszk.  $\overline{\text{BRAK}}$ " - uszkodzenie bloku polegające na stałym generowaniu sygnału zakazu.



Rys. 2.

Uszkodzenie typu "uszk. D" i "uszk.  $\overline{\text{BRAK}}$ ", o ile występują pojedynczo, prowadzą zawsze do "uszkodzenia bezpiecznego" UAR.

Przy użyciu symboli sumy i iloczynu logicznego oraz dodatkowego funktora 2Z3 sytuacje awaryjne UAR można przedstawić graficznie w postaci tzw. drzewa uszkodzeń /rys. 2/, będącego modelem następstw uszkodzeń blo-

ków funkcjonalnych i stanowiącego podstawę ilościowej oceny niezawodności rozważanego układu.

Na wyjściu UAR pojawi się sygnał powodujący nieuzasadnione wysuwanie się prętów regulacyjnych z rdzenia reaktora wtedy, gdy zachodzi co najmniej jedno z następujących zdarzeń<sup>x/</sup>:

A - gdy blok 10<sup>xx/</sup> układ zakazu/ ulegnie uszkodzeniu polegającemu na generowaniu sygnału wysuwania prętów regulacyjnych niezależnie od sygnału wejściowego /uszk. G/,

B - gdy na wejściu bloku 10, w wyniku uszkodzeń w pozostałej części UAR, pojawi się sygnał powodujący wysuwanie się prętów. Zdarzenie B ma miejsce wtedy, gdy równocześnie bloki 11, 12, 13 uległy uszkodzeniom, polegającym na utracie zdolności do generowania sygnałów zakazu /uszk. BRAK/ i jednocześnie zachodzą zdarzenia H i I.

Zdarzenie H polega na takim uszkodzeniu bloku śledzenia wartości uchybu w regulatorze głównym /blok 09/, że blok ten nie generuje sygnału zakazu /uszk. BRAK/.

Natomiast zdarzenie I ma miejsce wtedy, gdy:

- albo układ wyboru "2 z 3" /blok 08/ uległ uszkodzeniu, polegającemu na ciągłym generowaniu sygnału wysuwania prętów /uszk. G/;
- albo na wejściach regulatora, na skutek uszkodzeń bloków poprzedzających regulator, występuje kombinacja sygnałów, powodująca wytwarzanie przez regulator sygnału wysuwania prętów /zdarzenie M/.

Zdarzenie M występuje wtedy, gdy:

- albo na skutek uszkodzenia bloku pomiarowego 01 na jego wejściu pojawia się sygnał o wartości minimalnej /uszk. MIN/,
- albo gdy z układu dodatkowego 07 doprowadzony jest do wejścia regulatora sygnał o wartości minimalnej /zdarzenie P/,
- albo gdy z układu wartości zadanej /05/ na skutek uszkodzenia w jego obwodzie, podawany jest sygnał o wartości maksymalnej /zdarzenie Q/.

Zdarzenie P zachodzi wtedy, gdy układ dodatkowy /07/ uległ uszkodzeniu i generuje sygnał o wartości minimalnej lub uległ uszkodzeniu układ pomiarowy /blok 06/ i podaje na wejście bloku 07 sygnał o wartości minimalnej.

Natomiast zdarzenie Q ma miejsce wtedy, gdy:

- albo sam blok zadajnika na skutek uszkodzenia wytwarza sygnał o wartości maksymalnej;
- albo ma miejsce zdarzenie S polegające na jednoczesnym uszkodzeniu typu "brak działania" układu blokowania sygnału wyjściowego

<sup>x/</sup> - oznaczenia literowe wymienionych zdarzeń naniesiono na drzewo uszkodzeń UAR,

<sup>rys.</sup> 2.

<sup>xx/</sup> - numeracja bloków funkcjonalnych jak na rys. 1.

/15/ i uszkodzeniu typu "uszk. MAX" układu regulatora pomocniczego /14/ lub zajściu zdarzenie X.

Zdarzenie X polega na podawaniu z układu wyboru "2 z 3" /04/ sygnału o wartości maksymalnej /uszk. MAX/, co może być spowodowane:

- albo uszkodzeniem układu wyboru "2 z 3" polegającym na generowaniu sygnału maksymalnego,
- albo uszkodzeniem co najmniej dwóch układów pomiarowych /03/ i generowaniu przez te układy sygnałów o wartości maksymalnej.

Wielkościami wejściowymi drzewa uszkodzeń są zdarzenia polegające na występowaniu odpowiednich rodzajów uszkodzeń bloków funkcjonalnych UAR /zdarzenia te przedstawia się za pomocą tzw. poddrzew uszkodzeń/.

Zasady obliczania prawdopodobieństw zdarzeń /niezależnych/, gdy dane jest drzewo uszkodzeń są następujące:

- 1/ dla funkatora sumy zdarzeń  $P/A \cup B/ = P/A/ + P/B/ - P/A/ \cdot P/B/$
- 2/ dla funkatora iloczynu zdarzeń  $P/A \cap B/ = P/A/ \cdot P/B/$
- 3/ dla funkatora 2Z3  $P/A_1/ = P/A_2/ = P/A_3/ = P/A/$   
 $P/A_1 \# A_2 \# A_3/ = P/A/ (3 - 2 P/A/)$

Wykonując odpowiednie operacje arytmetyczne zgodnie z rodzajem i kolejnością funkatorów drzewa uszkodzeń, można wyliczyć prawdopodobieństwo uszkodzenia układu, gdy znane są prawdopodobieństwa uszkodzeń poszczególnych bloków funkcjonalnych.

### 3.4. Program RAFT

Program na maszynę cyfrową RAFT /w języku FORTRAN 1900/ umożliwia ocenę niezawodności UAR metodą drzewa uszkodzeń

oraz porównanie UAR ze względu na wymienione charakterystyki niezawodnościowe. Program analizuje drzewo uszkodzeń /rys. 2/, które może podlegać modyfikacjom polegającym na usunięciu odpowiednich bloków funkcjonalnych /brak grupy danych stanowi o pominięciu odpowiedniego bloku w strukturze drzewa/.

Dla poszczególnych bloków funkcjonalnych określa się poddrzewa uszkodzeń, których struktura może być dowolna - istnieje tylko ograniczenie do 64 liczby parametrów /danych o intensywnościach uszkodzeń i intensywnościach napraw/ oraz również do 64 funkatorów logicznych.

### 4. Wyniki badań niezawodnościowych różnych wersji układów regulacji elektrowni jądrowej typu WWER 440

Układ automatycznej regulacji elektrowni typu WWER 440 /rys. 3/ obejmuje następujące parametry regulacji i bloki funkcjonalne /zaznaczone na rys. 1 linią podwójną/:

PAR PODST - ciśnienie pary świeżej  
 01 UKŁ POM - tor pomiaru parametru podstawowego, czujnik i przetwornik ciśnienia /1P1, 1P2, 1P3/

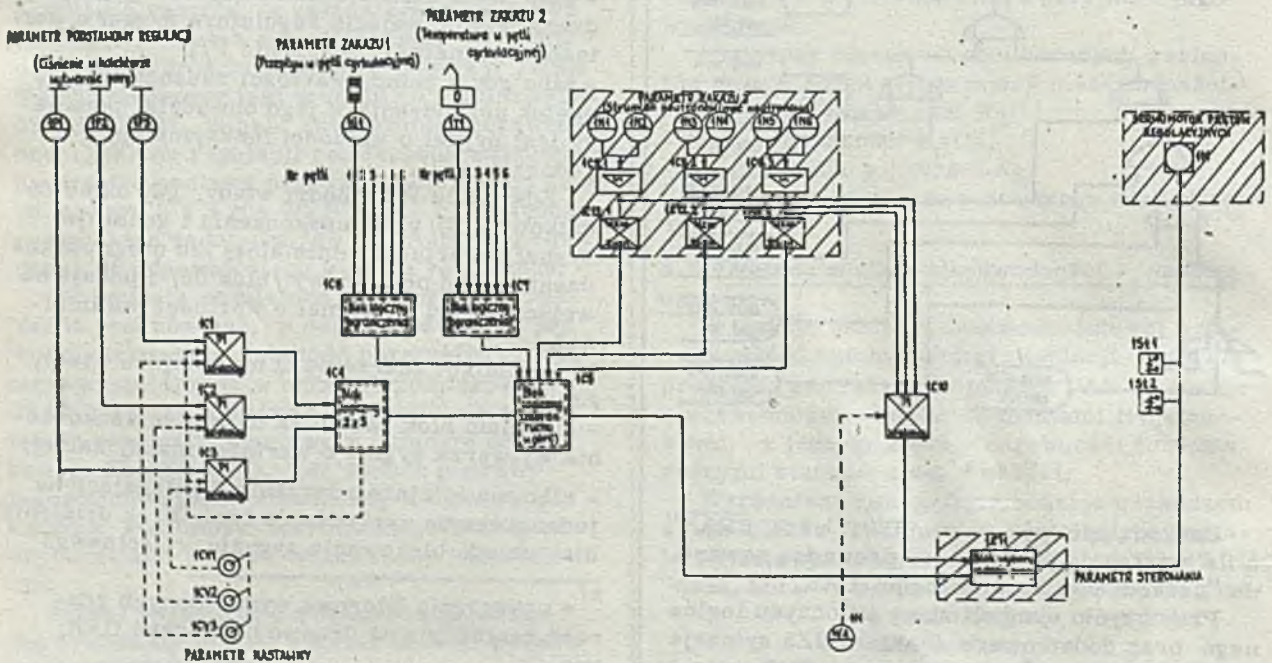
PAR NAST - parametr nastawy - wartość ustawiana ręcznie

05 ZADAJN - zadajnik stałowartościowy /1CV1, 1CV2, 1CV3/

02 UKŁ REG - układ regulatora głównego - regulator krokowy typu PI /1C1, 1C2, 1C3/

08 WYB 2Z3 - blok logiczny wyboru 2 z 3

PAR ZAK 1 - przepływ w pętli cyrkulacji  
 11 UKŁ POM - zespół sześciu czujników i przetworników przepływu /1G1, ... 1G6/ oraz blok logiczny /1C6/



Rys. 3.

PAR ZAK 2 - temperatura w pętli cyrkulacji 12 UKŁ POM - zespół sześciu czujników i przetworników temperatury /1T1, ..., 1T6/ oraz blok logiczny /1C7/

PAR ZAK 3 - natężenie strumienia neutronów 13 UKŁ POM - zespół czujników i przetworników natężenia strumienia neutronów /1N1, ..., 1N6/, wzmacniaczy logarytmicznych /1C9.1, 1C9.2, 1C9.3/ oraz wzmacniaczy różnicowych /1C12.1, 1C12.2, 1C12.3/ 10 UKŁ ZAK - układ zakazu ruchu prętów w górę /1C5/

PAR STER - parametr sterowania.

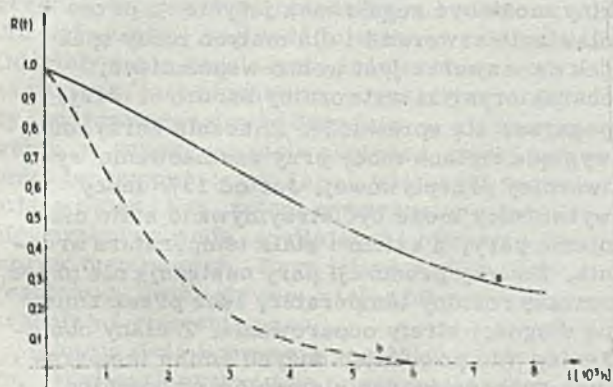
Korzystając z programu RAFT zbadano zachowanie się poszczególnych charakterystyk niezawodności pod wpływem modyfikacji struktury UAR, przede wszystkim - wpływ położenia bloku wyboru 2 z 3 na niezawodność UAR oraz znaczenie układu zabezpieczeń /bloki 10 UKŁ ZAK, 11 UKŁ POM, 12 UKŁ POM, 13 UKŁ POM/. Ten ostatni nie bierze bezpośrednio udziału w wytwarzaniu sygnałów regulacji, zmniejsza jedynie prawdopodobieństwo niebezpiecznego uszkodzenia całego systemu sterowania.

Badanie przeprowadzono dla dwóch zasadniczych wersji UAR:

- 1/ dla pełnego układu regulacji łącznie z układami zabezpieczeń,
- 2/ dla uproszczonego układu regulacji - bez układów zabezpieczeń.

Uzyskane wyniki prowadzą do następujących wniosków:

1.1. Stosowanie rezerwacji metodą zwielokrotnienia kanałów pomiarowych bądź regulacyjnych w pełnej wersji układu AR jest nieefektywne, gdyż zwiększa stopień skomplikowania układu, powoduje wzrost kosztów i gabarytów bez istotnej poprawy charakterystyk niezawodnościowych. Jest to wynikiem istnienia w UAR układów zabezpieczeń stanowiących rezerwę ciągłą.



Rys. 4.

2. Pominięcie układu zabezpieczeń znacznie pogarsza charakterystyki niezawodnościowe: - średni czas poprawnej pracy do pierwszego

uszkodzenia UAR z układami zabezpieczeń wynosił  $T_S = 7774$  h, zaś bez układu zabezpieczeń  $T_S = 1927$  h

- współczynnik gotowości wynosił odpowiednio  $A = 0.999$  i  $A = 0.996$

- przebieg funkcji niezawodności pokazano na rys. 4.

3/ Badanie wpływu lokalizacji układu wyboru 2 z 3 na niezawodność uproszczonego układu regulacji wykazało, że największą wartość współczynnika gotowości / $A = 0,99698$ / ma układ z rezerwą w kanale regulacyjnym, najmniejszą / $A = 0,99372$ / z rezerwą w kanale pomiarowym. Zastosowanie podwójnej rezerwy /tzn. układów wyboru 2 z 3/ w kanale pomiarowym i w kanale regulacyjnym/ nie daje spodziewanych wyników, gdyż w tym przypadku współczynnik gotowości  $A = 0,99689$ .

### 5. Zakończenie

Dalsze prace nad metodami analizy niezawodnościowej układów automatycznej regulacji elektrowni jądrowych powinny prowadzić do uwzględnienia problemów ekonomicznych i technicznych, związanych z rozbudową UAR wynikającą z wprowadzenia nadmiaru. Uwzględnienie różnych reżimów sterowania obciążeniem elektrowni jądrowych, /sterowanie automatyczne, ręczne, rozruchowe i awaryjne/ wymaga przeprowadzenia analizy efektywności /przy uogólnionym dla systemów złożonych pojęciu niezawodności/ sterowania.

### Literatura

- [1] J. Biernat, K. Kapłon, A. Kuraś, W. Zamojski: Uniwersalny program na maszynie cyfrową do obliczania i porównywania niezawodności układów regulacji automatycznej elektrowni jądrowych. Analiza porównawcza UAR elektrowni jądrowych typu WWER-440 Siemens i Westinhouse. Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej Raport nr 84. Wrocław 1974 /Na prawach rękopisu/
- [2] W. Zamojski, J. Biernat, K. Kapłon, A. Kuraś: Parametry niezawodnościowe elementów i urządzeń układów regulacji elektrowni jądrowej. Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Raport nr 30, Wrocław 1973 /Na prawach rękopisu/
- [3] M. Gołuszowa: Primienienije metoda "dierewa otkazow" dla analiza i raszczota nadziejnosti sistemy uprawlenija i zaszczity atomnowo reaktora elektrostancii" A 1. Konferencija SEW "Kontrol i uprawlenije atomnych reaktorów i elektrostancii. Warszawa, 22-27.10.1973.
- [4] W. E. Vesley: Reliability and fault tree applications at the NRTS. IEEE Trans. on Nuclear Science, February 1971, nr 1.



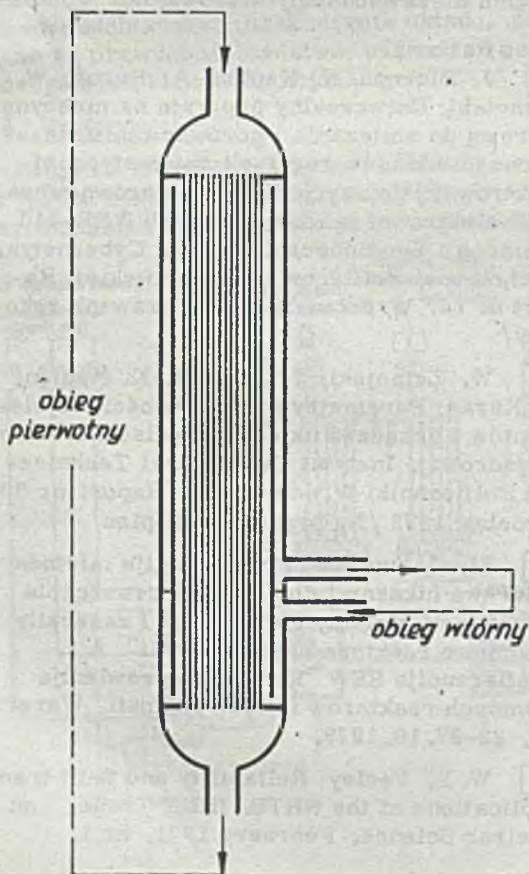
## WŁASNOŚCI DYNAMICZNE WYTWORNICY PRZEPLYWOWEJ

### PRZEZNACZONEJ DLA BLOKU WWER-1000

#### 1. Wprowadzenie

W elektrowniach jądrowych, zaopatrzonych w reaktory wodno-ciśnieniowe urządzeniem łączącym obwody: pierwotny i wtórny jest wytwornica pary. W większości typów wytwornic element grzejny, przez który przepływa wewnątrz gorąca woda z reaktora, jest całkowicie zanurzony we wrzącej wodzie. Wrzenie odbywa się w zasadzie w całej masie wody, ponad powierzchnię której wydostają się pęcherze pary wilgotnej. Konieczne jest odwodnienie pary przed skierowaniem jej do turbiny.

Inaczej zbudowana jest przepływowa wytwornica pionowa wykonywana przez zakłady Babcock i Wilcox. Jest to pionowy cylindryczny zbiornik, wewnątrz którego zamontowane jest



Rys. 1. Przepływowa wytwornica pary z podgrzewaczem scalonym

równoległe do osi kilka tysięcy rurek kilkunastomilimetrowej średnicy /rys. 1/. Wewnątrz rurek, z góry na dół, płynie gorąca woda obiegu pierwotnego. Do przestrzeni międzyrurkowej u dołu doprowadzana jest woda zasilająca obiegu wtórnego. Wędrując do góry woda podgrzewa się do stanu wrzenia, następnie odparowuje, aby po osiągnięciu stanu suchej pary nasyconej w górnej części wytwornicy, ulec przegrzaniu. W stosunku do przegrzewu w konwencjonalnych kotłach energetycznych, przegrzew w wytwornicy przepływowej jest niewielki, wynosi około 30 K, ale wystarczający, aby nie potrzebna było stosować separatorów wilgoci. Stanowi to jedną z ważnych zalet tego typu wytwornicy. Jak dla każdego wymiennika przeciwprądowego, stosunkowo duża jest różnica temperatur obu stron, a wymiana ciepła - intensywna, a więc dla tej samej mocy urządzenie jest mniejsze, lżejsze, koszty materiałowe są niższe.

Zasadą projektowania i eksploatacji elektrowni jądrowej jest utrzymywanie stałej temperatury średniej chłodziwa reaktora. W wytwornicach z całkowicie zanurzonym elementem grzejnym, przy zwiększaniu mocy bloku, dla zwiększenia wymiany ciepła trzeba obniżyć ciśnienie pary. Wobec tego moc turbiny może być regulowana jedynie przez dławienie zaworami i dla małych mocy spadek na zaworze jest wobec wspomnianej charakterystyki wytwornicy bardzo duży, pogarsza się sprawność. Znacznie korzystniej wygląda zmiana mocy przy zastosowaniu wytwornicy przepływowej. Już od 13% mocy w wytwornicy może być utrzymywane stałe ciśnienie pary, a zatem i stała temperatura wrzenia. Zmiany produkcji pary następują nie przez zmianę różnicy temperatur, lecz przez zmianę długości strefy odparowania. Zmiany obciążenia, nie powodując dużych zmian temperatury grubościennych elementów wytwornicy, mogą być przeprowadzane szybciej niż przy innych typach wytwornicy. Możliwa jest również regulacja mocy bloku bez udziału zaworów turbinowych, oczywiście kosztem zmienności ciśnienia w wytwornicy.

Mimo że schemat działania wytwornicy przepływowej wydaje się bardzo prosty, jej własności dynamiczne są dużo trudniejsze do określenia niż dla wytwornic z całkowicie

zanurzonym elementem grzejnym. W tych ostatnich z dużym przybliżeniem można założyć idealne wymieszanie czynnika wtórnego i wynikające stąd skupienie parametrów. W wytwornicy przepływowej opis matematyczny musi uwzględniać rozłożenie parametrów wzdłuż wytwornicy, a więc posługiwać się równaniami cząstkowymi. Dodatkowa trudność obliczeniowa wynika z faktu, że w obrębie strefy odparowania prędkość czynnika zwiększa się aż 30-krotnie.

## 2. Sterowanie pracą wytwornicy przepływowej w ramach bloku

Jeżeli przyjmie się /jak to ma miejsce w rzeczywistej elektrowni/ stałość przepływu czynnika pierwotnego, to wielkościami wejściowymi dla wytwornicy pozostają:

- temperatura dopływającego czynnika pierwotnego,
- przepływ wody zasilającej,
- temperatura wody zasilającej /obwód wtórny/,
- opór na wypływie pary z wytwornicy.

Ta ostatnia wielkość dotyczy zmiennej z otwarciem zaworów regulacyjnych turbiny charakterystyki przepływu pary w funkcji ciśnienia. Wielkościami wyjściowymi wytwornicy są:

- przepływ pary,
- ciśnienie pary,
- temperatura pary,
- temperatura czynnika pierwotnego na wylocie.

Spośród wielkości wejściowych nie wszystkie mogą spełniać rolę wielkości regulujących, a spośród wyjściowych - nie wszystkie regulowanych.

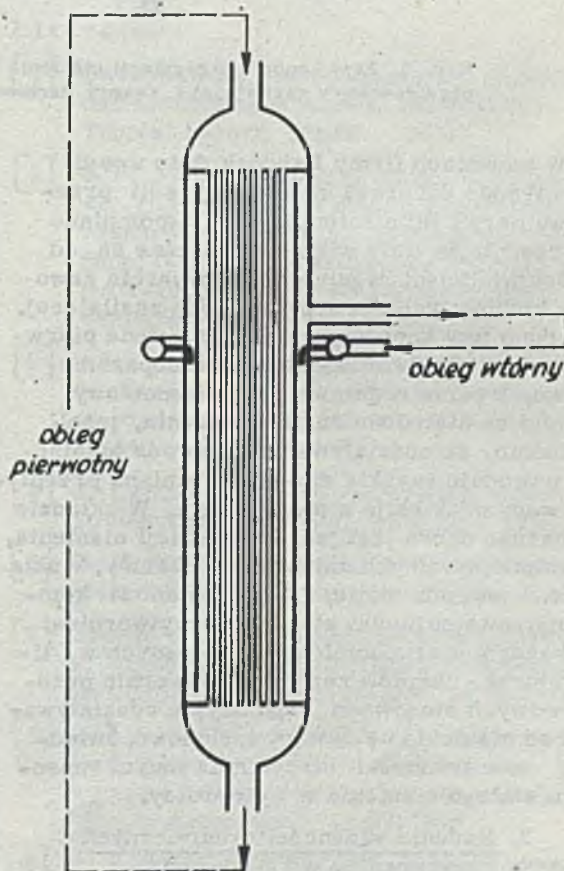
Temperatura dopływającego do wytwornicy czynnika pierwotnego dyktowana jest przez nie wytwornicowy, a reaktorowy układ regulacji średniej temperatury chłodziwa w reaktorze i dla wytwornicy wielkość ta stanowi zakłócenie. Oddziaływanie regulacyjne temperatury wody zasilającej jest niewielkie, a poza tym względu wytrzymałościowe decydują o utrzymaniu w dużym zakresie stałej wartości tej temperatury. Jako wielkości regulujące mogą być zatem wykorzystane jedynie przepływ wody zasilającej i otwarcie zaworów turbinowych. Przy ich pomocy można regulować dwie główne wielkości wyjściowe: przepływ i ciśnienie pary.

Istnieją dwie koncepcje regulacji mocy bloku. Pierwsza przewiduje utrzymanie stałego ciśnienia w wytwornicy i regulowanie mocy zaworami turbinowymi. W drugiej rezygnuje się z jednej wielkości wejściowej przez jej ustalenie - zawory turbinowe są całkowicie otwarte, a przepływem wody reguluje się moc bloku. Temperatury wylotowe: pary i czynnika pierwotnego są wielkościami wynikającymi /w obu podanych koncepcjach nie są i nie mogą być regulowane/. Konstrukcja wy-

twornicy musi zapewniać w całym obszarze przegrzew wystarczający dla bezpiecznej pracy turbiny. Natomiast, ze względu na reaktor, wymaga się łagodnych przebiegów temperatury wypływającego czynnika pierwotnego.

Więcej niż skromna jest liczba publikacji na temat własności dynamicznych wytwornicy, przy czym we wszystkich napotkanych podaje się przebiegi dla wytwornic już zaopatrzonych w układy automatycznej regulacji.

Pokazana na rys. 1 wytwornica jest dla firmy Babcock i Wilcox wytwornicą już drugiej generacji. W pierwszej generacji /rys. 2/ zupełnie inny był sposób zasilania wodą. Woda wtryskiwana była do przestrzeni między płaszczowej i doprowadzana do stanu wrzenia przez kontakt z recyrkulującą parą. Dopływ nasyconej wody do przestrzeni między rurkowej zapewniony był przez odpowiedni jej słup w przestrzeni międzypłaszczowej. W trakcie prób modelu fizycznego wytwornicy okazało się, że występują oscylacje jej parametrów wyjściowych o okresie 4 ÷ 5 s. Przyczyną



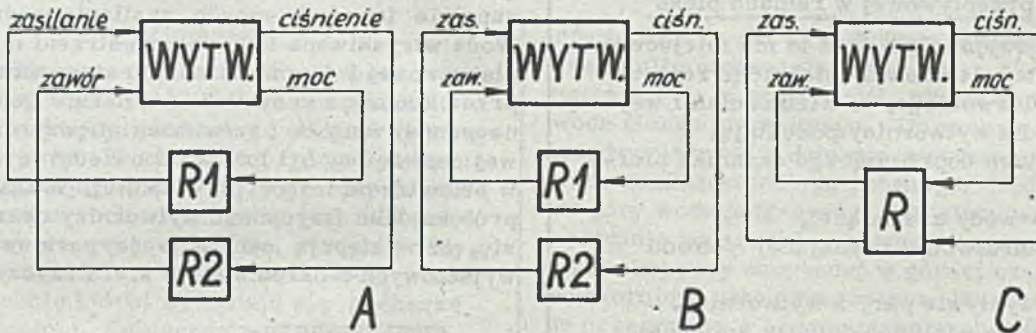
Rys. 2. Przepływowa wytwornica pary z podgrzewem recyrkulującą parą

tych drgań, znanych również w konwencjonalnych kotłach przepływowych, było ujemne w pewnych przypadkach nachylenie charakterystyki oporów przepływu. Wstawienie dodatkowego oporu na wlocie do przestrzeni międzypłaszczowej praktycznie usunęło drgania.

Zgodne są co do charakteru i wartości statycznych czasowych wyniki doświadczalne firmy Babcock z obliczeniami prowadzonymi w Instytucie Techniki Ciepłej, opisanymi w dalszej części artykułu. Bardzo charakterystyczny jest przede wszystkim przebieg produkcji pary po skokowym zwiększeniu przepływu wody zasilającej. W ciągu pierwszych 16 s /odpowiada to mniej więcej czasowi przebywania cząstki wody w strefie podgrzewu/ nie dostrzegamy skutku, a dopiero potem następuje wzrost w kierunku nowej wartości ustalonej.

wanie się wytwornicy. To ostatnie jest ułatwione przez zaopatrzenie stoiska w szereg układów automatycznej regulacji.

Równocześnie z przygotowaniem stoiska rozpoczęto teoretyczne prace nad modelem dynamicznym zjawisk w wytwornicy. Model ma służyć doborowi struktury i nastaw układów regulacji i zabezpieczeń związanych z wytwornicą. Porównanie danych otrzymanych z modelu matematycznego i ze stoiska umożliwi doskonalenie modelu przyjęte bowiem założenia,



Rys. 3. Trzy koncepcje regulacji ciśnienia i przepływu pary /mocy/ z oddziaływaniem na przepływ wody zasilającej i zawory turbinowe

W badaniach firmy Babcock dużo uwagi poświęcono doborowi układu regulacji przepływu pary i jej ciśnienia. Jak wspomniano poprzednio, te dwie wielkości zależne są od dwóch wielkości regulujących: otwarcia zaworów turbinowych i przepływu wody zasilającej. Zbadano trzy koncepcje /rys. 3/ - dwie pierwsze zakładały dwa regulatory jednoparametrowe, trzecia regulator dwuparametrowy. Wyniki są nietrudne do przewidzenia, jeżeli wiadomo, że oddziaływanie na zawór turbinowy powoduje szybkie zmiany, a zmiana przepływu wody oddziałuje z opóźnieniem. W układzie A bardzo dobra jest jakość regulacji ciśnienia, kosztem powolnych zmian mocy turbiny, w układzie B jest odwrotnie. Układ C stanowi kompromisowe optimum sterowania wytwornicą. W każdym z uruchomionych, opisanych w literaturze, układów regulacji wytwornicy przepływowych stosowano regulacyjne oddziaływanie od ciśnienia na zawory turbinowe. Świadczy to o trudności utrzymania innym sposobem stałego ciśnienia w wytwornicy.

### 3. Badania własności dynamicznych wytwornicy w ITC w Łodzi

W Instytucie Techniki Ciepłej - instytucie branżowym Zjednoczenia "Zemak", prowadzone są prace nad konstrukcją, technologią i opisem zjawisk w przepływowej wytwornicy pary dla elektrowni jądrowej. W tym celu uruchamiane jest stoisko, na którym określi się współczynniki wymiany ciepła, opory przepływu, dokona się doboru przegród usztywniających, zbada się korozję naprężenia itd, jak również można będzie zbadać dynamiczne zach

a jeszcze bardziej - wartości parametrów mogą znacznie odbiegać od rzeczywistości. Niestety, opóźnienie w uruchomieniu stoiska umożliwi taką konfrontację dopiero pod koniec 1975 roku.

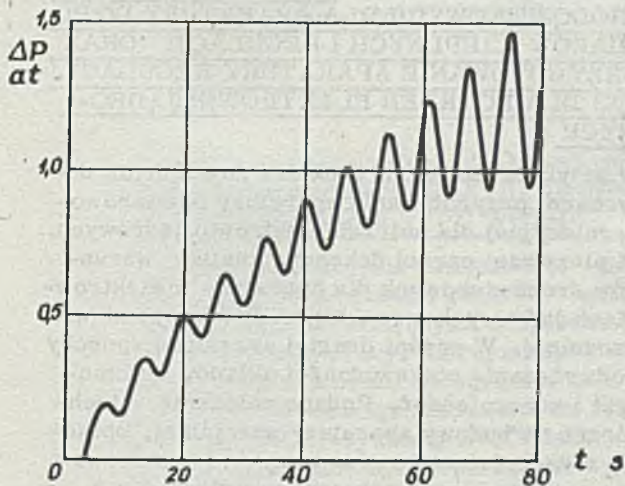
A oto najważniejsze założenia upraszczające!

- 1/ Podział wytwornicy na cztery strefy obliczeniowe, w ramach których ustalone są wartości współczynników wymiany ciepła. Mieszanina parowo-wodna jest jednorodna i stała w każdym przekroju poprzecznym strony wtórnej.
- 2/ Proporcjonalność strumienia ciepła do różnicy temperatur. W strefach odparowania /II i III/ wartości współczynników wymiany są stałe, w strefach I - podgrzewu wody i IV - przegrzewu pary są liniowo zależne od prędkości czynnika.
- 3/ Równość ciśnienia na całej długości /wysokości/ wytwornicy, a więc nieuwzględnianie równania ilości ruchu.
- 4/ Pominięcie pojemności cieplnej konstrukcji wytwornicy.
- 5/ Brak rozszerzalności cieplnej podgrzewanej wody.

Utworzony model wytwornicy jest modelem nieliniowym, umożliwiającym badania w szerokim zakresie obciążeń wytwornicy. Zastosowano w nim analizę wędrowną Lagrange'a, tzn. obliczono parametry wybranych wędrujących wzdłuż wytwornicy cząstek czynnika pierwotnego i wtórnego. Pozwoliło to na uproszczenie numerycznego rozwiązania równań i zapobieżenie niestabilności numerycznej. Program napisano w języku ALGOL-1204.

Korzystając z tego samego zestawu równań po przeprowadzeniu linearyzacji wokół punktu obciążenia znamionowego i dołączeniu dodatko-

wych uproszczeń, na maszynie analogowej WAT-1001B wykonano i przebadano analogowy model wytwornicy. Przy pomocy obu modeli: cyfrowego i analogowego badano odpowiedź wytwornicy na skokowe zmiany otwarcia zaworu turbinowego, przepływu wody zasilającej i temperatury dopływającego czynnika pierwotnego. Zgodność wyników otrzymanych z obu modeli była zupełnie dobra. Okazało się, że w określonych warunkach i przy podanych założeniach upraszczających mogą powstać drgania parametrów wyjściowych o narastającej amplitudzie i okresie ok. 5 s /rys. 4/. Zastanawiająca jest zgodność okresu z wynikami badań firmy Babcock, mimo że mechanizm powstawania drgań jest zupełnie inny.



Rys. 4. Przykładowy przebieg ciśnienia w wytwornicy wskazujący na jej niestabilną pracę

Nie uwzględniając szczegółów analiz i obliczeń można stwierdzić, że mechanizm drgań opiera się na wzajemnym sprzężeniu produkcji pary i ciśnienia w wytwornicy, przy czym obustronne działania są opóźnione /ścisły związek z czasem transportu cząstki czynnika wtórnego przez strefy odparowania/. Decydująca dla powstania drgań jest mała wartość strumienia ciepła w punkcie początku odparowania - w tym miejscu różnica temperatur strony pierwotnej i wtórnej jest rzędu 15 K. Po zwiększeniu strumienia lub po dołączeniu do wytwornicy odpowiednio dużej objętości drgania ustępują.

Dwa z proponowanych założeń upraszczających działają w kierunku destabilizacji - pierwsze i drugie. W rzeczywistej wytwornicy w przekroju poprzecznym parametry czynnika wtórnego nie są wyrównane. Tam, gdzie średnio woda nie osiągnęła jeszcze stanu wrzenia, w pobliżu rurek wydzielają się już pęcherzyki pary, intensyfikując wymianę ciepła /a więc stabilizując/.

Z drugiej strony zakłada się proporcjonalność wymiany ciepła do różnicy temperatur czynników po obu stronach. Dane źródłowe dotyczące tej sprawy nie są zgodne, na ogół mówi się o proporcjonalności do pewnej potęgi różnicy temperatur  $\Delta t$ , o wykładniku

większym od jedności. Jeżeli tak rzeczywiście jest, wówczas istnieje szybkie sprzężenie od ciśnienia w wytwornicy do produkcji pary /poprzez zmianę temperatury wrzenia i  $\Delta t$ / stabilizujące pracę wytwornicy.

Potrzebne jest więc skonfrontowanie wyników obliczeń z badaniami na stoisku. Pewne jest natomiast to, że jeżeli nawet w badanej wytwornicy przepływowej nie wystąpi niestabilność, to jednak w wytwornicy przepływowej pracującej przy innych parametrach taka niestabilność może zaistnieć. Ma to duże znaczenie poznawcze.

Prowadzone na modelu cyfrowym obliczenia przebiegów wielkości wyjściowych, przy założeniu stałości ciśnienia, a więc tak jakby przy idealnym układzie regulacji ciśnienia oddziałującym na zawór turbinowy, wskazują na stabilną pracę wytwornicy.

Po uściśleniu, na podstawie badań stoiskowych wartości parametrów modeli, będą one dobrym narzędziem właściwego doboru układu regulacji i zabezpieczeń wytwornicy przepływowej.

#### Literatura

- [1] Once-through steam generator research and development report, BAW-10027 Topical report, April 1971
- [2] B. N. Mc Donald, R. C. Post, J. S. Scarce: Once-through steam generator research and development report; Supp. 1-Integral Economizer OTSG, BAW-10027, Supp. 1 - topical report, September 1972
- [3] B. N. Mc Donald, J. S. Scarce, E. R. Michaud: Betriebsergebnisse von Dampferzeugern des Kernkraftwerks Oconee-1. Atomwirtschaft 1974, nr 12
- [4] J. Lempert i in.: Blockregelung eines Druckwasserreaktors, BWK nr 7/1974
- [5] D. Blunck: Instabilitäten in Vorverdampfern von Dampferzeugern BWK nr 2/1968
- [6] Atomnyje paroproizwoditelnyje ustanowki kompanii Babcock Wilcox Ekspresinformacja "Tiepłoenegietika" nr 38/1971
- [7] Dynamika AES s reaktorami s wodjo pod dawlieniem /PWR/ i modielirowanie parogeneratorow. Ekspresinformacja "Tiepłoenegietika" nr 35/1974
- [8] H. Hampel i in.: Projekt studjalny przepływowej wytwornicy pary o mocy 250 mW dla elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym. Sprawozdanie ITC /niepublikowane/ Łódź 1971
- [9] A. Werner: Własności dynamiczne wytwornicy pary i projekt struktury układu jej regulacji i zabezpieczeń. Etap Ia: Oprogramowanie udoskonalonego modelu dynamicznego wytwornicy i obliczeń wyników pomiarów na stoisku. Sprawozdanie ITC /niepublikowane/ Łódź 1974.

J. Pollak: STAN PRAC NAD ZAGADNIENIEM AUTOMATYZACJI ELEKTROWNI JĄDROWYCH W POLSCE

Referat zawiera podstawowy materiał wprowadzający do pozostałych referatów i komunikatów Konferencji. Obok ogólnej charakterystyki tematyki i zakresu prac prowadzonych w kraju w dziedzinie automatyzacji elektrowni jądrowych /w tym prac aktualnie realizowanych i zamierzeń na najbliższą przyszłość/, w referacie zawarto podstawowe dane o planach rozwoju energetyki jądrowej w Polsce i w krajach RWPG oraz przeprowadzono analizę celowości prowadzenia prac badawczych i dostaw systemów automatyki elektrowni jądrowych przez przemysł krajowy. Podano również informacje pozwalające zrozumieć specyfikę problematyki automatyzacji elektrowni jądrowych i jej związku z automatyzacją innych dziedzin przemysłu, a zwłaszcza energetyki konwencjonalnej. Treść referatu dostarcza jednocześnie danych do przeprowadzenia dyskusji nad dalszym rozwojem tej dziedziny w kraju.

Z. Jakubowski, T. Tomczak: DOŚWIADCZENIA ZAGRANI CZNE I TENDENCJE ROZWOJOWE SYSTEMÓW AUTOMATYKI ELEKTROWNI JĄDROWYCH Z REAKTORAMI WODNO-CIŚNIENIOWYMI

Na podstawie analizy istniejących rozwiązań systemów automatyki elektrowni jądrowych z reaktorami PWR dokonano próby nakreślenia dalszego kierunku rozwoju tych systemów. Uwaga autorów koncentruje się na problemach ogólnej struktury systemu, zakresu automatyzacji, sterowania mocą, zabezpieczeń i zastosowania techniki cyfrowej. Przy omawianiu zagadnień związanych z techniką cyfrową sięgnięto również do przykładów rozwiązań z reaktorami AGR i BWR jako bardziej zaawansowanych.

S. Kisielewicz, K. Kowalski, A. Nawrocki, J. Radzio, T. Stankiewicz: WŁASNOŚCI DYNAMICZNE BLOKU JĄDROWEGO WWER-440 UZYSKANE NA DRODZE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO

W pracy zaprezentowany jest liniowy model matematyczny uproszczonego układu cieplnego bloku jądrowego z reaktorem WWER-440. Przytoczono charakterystyki czasowe niektórych parametrów bloku /istotnych dla analizy układu regulacji mocy bloku/, uzyskane z rozwiązania modelu dla zakłóceń od strony

źródła i odbioru energii, w dwóch różnych okresach kampanii paliwowej. Obok interpretacji wyników zamieszczono ocenę porównawczą w stosunku do publikowanych danych teoretycznych i doświadczalnych.

S. Knorr, J. Nieckarz: ANALIZA WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH DLA APARATURY DOPOMIARÓW CIEPLNYCH I REGULACJI ORAZ PRZYGOTOWANIE APARATURY REGULACYJNEJ DLA POTRZEB ELEKTROWNI JĄDROWYCH

W artykule omówiono niektóre zagadnienia dotyczące przygotowania aparatury pomiarowo-regulacyjnej dla potrzeb elektrowni jądrowych. W pierwszej części dokonano analizy warunków środowiskowych dla aparatury w elektrowniach jądrowych z reaktorem PWR w obudowie szczelnej. W części drugiej określono sposoby podwyższania niezawodności układów automatyki i zabezpieczeń. Podano założenia techniczne do budowy aparatury specjalnej, opisano zasadę działania oraz przykład zastosowania aparatu: automatycznego wyboru 2 z 3.

J. Korytkowski, J. Kurilec, K. Szulc: ELEMENTY AUTOMATYKI SYSTEMU URS III-M - INTELEKTRAN /WERSJA MODUŁOWA/

Podano krótko informacje o zastosowaniach i budowie modułów systemu URS III-M-INTELEKTRAN oraz ich główne dane techniczne. Wskazano możliwości współpracy z innymi systemami, m.in. z systemami komputerowymi.

S. Chwaszczewski: INCORMER - KOMPUTEROWY SYSTEM POMIARÓW WEWNĄTRZRDZENIOWYCH REAKTORÓW WWER-440 I WWER-1000

Omówiono rolę systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych przy eksploatacji energetycznych reaktorów wodno-ciśnieniowych. Przedstawiono trudności związane z przeprowadzeniem pomiarów wewnątrz rdzenia reaktora i stosowane do tych celów czujniki. Na tym tle przedstawiono koncepcję i rozwiązania techniczne opracowywanego w Instytucie Badań Jądrowych oraz w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów "Mera-PIAP" systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktorów WWER-440 i WWER-1000 - systemu INCORMER.

A. L. Libura: INCORMER-T KOMPUTEROWY PODSYSTEM POMIARU TEMPERATURY WEWNĄTRZ RDZENIA REAKTORA ENERGETYCZNEGO

Omówiono komputerowy podsystem pomiaru temperatury INCORMER-T, wchodzący w skład systemu INCORMER przeznaczonego do centralnej rejestracji i przetwarzania wyników pomiarów parametrów wewnątrzrdzeniowych reaktorów energetycznych. Przedstawiono wymagania stawiane podsystemowi, wynikające z ważności zadań, do jakich jest przeznaczony. Na tym tle opisano metody i środki techniczne podjęte przez konstruktorów celem sprostanienia tym wymaganiom. Podano także podstawowe parametry metrologiczne i funkcjonalne modelu T-8 podsystemu INCORMER-T.

S. Chwaszczewski: OPROGRAMOWANIE SYSTEMU POMIARÓW WEWNĄTRZRDZENIOWYCH REAKTORÓW TYPU WWER

Przedstawiono pojęcia i zależności między fizycznymi parametrami rdzenia reaktora a wielkościami określającymi bezpieczeństwo i ekonomikę jego pracy. Korzystając z tych relacji przedstawiono oprogramowanie systemu pomiarów wewnątrzrdzeniowych reaktorów typu WWER-systemu INCORMER. Dokładniej omówiono oprogramowanie związane ze specyfiką pracy systemu z reaktorem energetycznym: oprogramowanie realizujące funkcje podstawowe przetwarzania danych z beta emisyjnych detektorów neutronów i wewnątrzrdzeniowych termopar oraz oprogramowanie realizujące funkcje specjalne systemu: obliczenia rozkładów generowanej mocy, bilansu paliwa, marginesów do wystąpienia krytycznych poziomów generacji mocy.

B. Filipiak, K. Mlicki: KONCEPCJA NOWEGO SYSTEMU DOZYMETRYCZNEGO ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM WWER-440

Praca obejmuje koncepcję układu dozymetrycznego dla pierwszej krajowej elektrowni jądrowej przeznaczonego do kontroli technologii, usuwania odpadów i występujących pól promieniowania w czasie normalnej eksploatacji obiektu i w okresie remontowym. W pracy omówiono założenia dla przyjęcia koncepcji układu pomiarowego, opis stacjonarnego systemu pomiarowego, opis wyposażenia w aparaturę pomiarową: przenośną, laboratoryjną, kontroli indywidualnej oraz zagrożenia okolicy.

A. Krzycki, A. Ostrowski, J. Jabłońska: BADANIA OPRACOWANYCH W IBJ ELEMENTÓW SYSTEMU KONTROLI ROZRUCHU I PRZEŁADUNKU PALIWA W REAKTORACH TYPU WWER I WDROŻENIA TEGO SYSTEMU W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Artykuł prezentuje system pomiarowy rozszerzający o dwie dekady obszar niskich mocy, w których kontrolowany jest stan strefy aktywnej reaktora WWER. Opisano krótko warunki panujące w reaktorze i wymagania stawiane detektorom służącym do pomiarów wewnątrz i zewnątrzrdzeniowych. Podano podstawowe dane detektorów i aparatury. Opisano pomiary wykonane w czasie rozruchu reaktora, które obejmują kontrolę przebiegu rozruchu i pomiar rozkładów wydzielania energii w kasetach paliwowych, rozkładu strumienia neutronów ponad strefą aktywną oraz pomiary wykonane w czasie przeładunku paliwa. Przedstawiono najważniejsze wyniki pomiarów. W zakończeniu dokonano porównania opracowanego systemu z standardowym wyposażeniem reaktora, przedstawiono korzyści płynące z zastosowania dodatkowego systemu i wymieniono obiekty, w których aparatura została użyta.

J. Kaniewski, P. Szulc, T. Zieliński: SAKOR-B, SYSTEM BLOKOWEJ APARATURY NEUTRONOWEJ KONTROLI MOCY GLOBALNEJ REAKTORÓW

Artykuł omawia założenia systemu, przeznaczenie i podstawowe dane techniczne bloków funkcjonalnych oraz podaje przykłady zestawienia z tych bloków różnych torów pomiarowo-kontrolnych dla systemów zabezpieczeń i sterowania reaktorów jądrowych. Zgodnie z założeniami są to tory analogowe, przystosowane jednak zarówno do przekazywania informacji do systemów CRPD, jak i do ewentualnej współpracy z maszyną cyfrową w hybrydowych systemach sterowania.

A. Ostrowski: METODY IŁOŚCIOWE BADAŃ PRZECIWZAKŁÓCENIOWYCH REAKTOROWYCH LINII KONTROLNO-POMIAROWYCH

Omówiono w skrócie problem zakłóceń elektrycznych występujących przy pracy reaktorowych linii kontrolno-pomiarowych i przedstawiono uproszczony model mechanizmu wnoszenia się zakłóceń do obwodów pomiarowych prowadzący do zdefiniowania tzw. impedancji przejściowej  $Z_T$  jako parametru określającego jakość instalacji z punktu widzenia odporności na zakłócenia. Przedstawiono układy pomiaru impedancji przejściowej oraz wartości otrzymywane dla różnych kabli i złącz, wskazując na możliwość ich wykorzystania na etapie projektu oraz na konieczność przeprowadzania testu gotowej instalacji w obiekcie.

J. Pollak, T. Tomczak: UKŁADY REGULACJI  
ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM  
WVER-440

Omówiono zasady regulacji elektrowni z reaktorem WVER-440. Przedstawiono struktury ważniejszych układów regulacji automatycznej, występujących w rozwiązaniu radzieckim. Dokładniej opisano algorytm sterowania regulatorem mocy ARM. Scharakteryzowano radziecką aparaturę automatycznej regulacji i propozycje wyposażenia w urządzenia produkcji polskiej.

Z. Jakubowski, T. Tomczak: SYSTEM STEROWANIA BINARNEGO ELEKTROWNI Z REAKTOREM WVER-440

Przedstawiono koncepcję automatyzacji sterowania binarnego EJ z reaktorem WVER-440. Omówiono funkcje automatów sterowania binarnego, strukturę systemu oraz zasady współpracy ze sterowaniem ręcznym, systemem zabezpieczeń i układami regulacji. Scharakteryzowano techniczne cechy systemu MASTER, którego moduły służyć mają do syntezy automatów. Przedstawiono również wstępne założenia dotyczące zakresu automatyzacji pierwszych polskich bloków jądrowych z reaktorami WVER-440.

W. Zamojski: METODA ANALIZY NIEZAWODNOSCIOWEJ SYSTEMÓW STEROWANIA EJ I WYNIKI BADAŃ NIEZAWODNOSCIOWYCH RÓŻNYCH WERSJI UKŁADÓW REGULACJI ELEKTROWNI JĄDROWEJ WVER-440<sup>1)</sup>

Przedstawiono skomputeryzowaną metodę analizy niezawodnościowej układów automatycznej regulacji obciążenia elektrowni jądrowej. Metoda ta, łącznie z programem RAFT na maszyny cyfrowe serii ODRA 1300, umożliwia badanie różnych modyfikacji struktur niezawodnościowych UAR oraz wybór struktury optymalnej. Przeprowadzono analizę niezawodnościową różnych wersji układu regulacji elektrowni jądrowej WVER-440.

A. Werner: WŁASNOCI DYNAMICZNE WYTWORNICY PRZEPLYWOWEJ PRZEZNACZONEJ DLA BLOKU WVER-1000

Opisano działanie wytwornicy przepływowej oraz prowadzone w ITC w Łodzi badania własności dynamicznych wytwornicy, na modelach: matematycznym i analogowym tego urządzenia.

/dokończenie ze str. 63/

- [7] A. Janikowski, A. Krzycki, A. Ostrowski: - Szerokodiapazonowa impulsno-tokowa i zmierznielna linia ILR-4 dla kontrola puszka i pieriegruzki TWEL w reaktorach tipa WVER. Referat nr 2-33, jak w [3]
- [8] A. Ostrowski, A. Janikowski - Szerokodiapazonowa linia tipa ILR-4 izmieriajuszczaja skorost' scziota impulsow toka kamier dieliena, osobenno dla kontrolja zapuskom reaktora. Referat nr 3-5/4-11, jak w [3]

- [9] A. Krzycki, A. Ostrowski, A. Janikowski, P. Czerwiński - Rezultaty eksploatacionnoji prowierki polskoj izmieritielnoj apparatu: ry dla kontrolja reaktora AES Rainsberg pri małych potokach nieutronow.
- [10] L. Chaniger, A. Ostrowski - Szerokodiazonnyj izmieritielnyj kanał. Referat nr 2-32/4-7, jak w [3]
- [11] A. Krzycki - Linia izmeriajuszczaja nieprierywno potok niejtronow w szerokom diapazonie w kritsborkach i issledowatiel skich reaktorow. Simpozjum Opyt eksploatacji i ispolzowanija issledowatiel skich reaktorow. Priedeał 1974.

Cena 43. - zł

Pren. roczna 516. - zł

