

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN
MINISTERSTWA ENERGETYKI, MINISTERSTWA PRZEMYSŁU MASZYNOWEGO,
STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

ROK XXXI

ZESZYT 4

21.IV.1955

Zarówno w przemyśle ciężkim, jak i w przemyśle produkującym artykuły konsumpcyjne, niezbędne jest skierowanie uwagi na osiągnięcie postępu technicznego, na rozpowszechnienie wniosków racjonalizatorskich i przodujących metod pracy. Należy zerwać z metodami doraźnej tylko współpracy z nauką, ustalić w każdej gałęzi przemysłu węzłowe problemy długofalowej polityki technicznej i śmiało wspólnie z pracownikami nauki szukać dróg rozwiązania, walczyć o wkład polskiej myśli naukowej i technicznej do dorobku postępowej nauki i techniki świata.

Pomoc Związku Radzieckiego umożliwia nam przyspieszenie naszych prac nad zbudowaniem stosu atomowego, podjęcie nowych badań w oparciu o dostarczone nam przez Związek Radziecki niezbędne materiały i dane techniczne, kształcenie kadr dla przyszłej produkcji energii atomowej do celów pokojowych w Polsce.

B. BIERUT
(III Plenum KC PZPR)



WYDAWNICTWO NACZELNEJ ORGANIZACJI TECHNICZNEJ

SPIS RZECZY

Wyzyskanie energii atomowej jest dla ludzkości koniecznością.
Ney W. Projekty wyzyskania energii atomowej do produkcji energii elektrycznej.
Wołczek O. Reaktory jądrowe do wytwarzania energii elektrycznej.
Andrzejewski S. Materiały do budowy reaktorów atomowych.
Nartowski Z. Urządzenia kompensatorów synchronicznych.
Demel W. Linie elektroenergetyczne o pełnym wyzyskaniu izolacji drewna.
Martini L. Kraty wielokrotne.
Przyłuski A., Skoczyński Z. W sprawie schematów zastępczych sieci biernych o n zaciskami.
Sprawozdanie z działalności oddziałów SEP w 1954 r.
Biuletyn Instytutu Elektrotechniki:
Wyznaczanie początku krzywej napięcia powrotnego w wyłącznikach trakcyjnych.
Wydawnictwa nadesłane.
Przegląd Dokumentacyjny Elektrotechniki.

СОДЕРЖАНИЕ

Использование атомной энергии является для человечества необходимостью.
Ней В. Проекты использования атомной энергии для производства электрической энергии.
Волчек О. Ядерные реакторы для производства электрической энергии.
Андреевский С. Материалы для постройки атомных реакторов.
Нартовский З. Установки синхронных компенсаторов.
Демель В. Линии электропередачи с полным использованием изоляции дерева.
Мартини Л. Многократные решетки.
Пшилуский А., Скочинский З. По вопросу схем замещения реактивных сетей с n зажимами.
Отчет о деятельности ОПЭ в 1954 году.
Бюллетень Электротехнического Института:
Определение начала кривой возвратного напряжения в тяговых выключателях.
Поступившие публикации.
Библиографический Обзор Электротехники.

CONTENTS

The use of atomic energy is essential for mankind.
Ney W. Projects for utilising atomic energy in the production of electric power.
Wołczek O. Nuclear reactors for electric power generation.
Andrzejewski S. Materials for the construction of atomic reactors.
Nartowski Z. Synchronous compensator equipment.
Demel W. Transmission lines making full use of wood insulation.
Martini L. Multiple frameworks.
Przyłuski A., Skoczyński Z. On the subject of equivalent diagrams for reactive power lines with n terminals.
Report on the 1954 activities of A. P. E. E. branches.
Bulletin of the Electrotechnical Institute:
Fixing the starting point of the curve of return current of traction circuit-breakers.
Publication received.
Electrical Bibliographic Review.

Studia zaoczne w dziedzinie elektrotechniki

Uchwałą nr 583 Prezydium Rządu zostały utworzone w wyższych uczelniach technicznych studia zaoczne. Uchwała ta ma na celu udostępnić przodującym pracownikom uspołecznionych zakładów pracy, aktywistom w pracy zawodowej i społecznej, majstrom, technikom oraz pracownikom pedagogicznym szkolnictwa zawodowego podniesienie kwalifikacji zawodowych i uzyskanie dyplomu inżyniera bez odrywania się od pracy zawodowej.

Studia zaoczne przewidziane są dla kandydatów, mających średnie wykształcenie w zakresie liceum technicznego lub szkoły ogólnokształcącej stopnia licealnego oraz mogących się wykazać co najmniej jednoroczną pracą zawodową odbytą w danym zakładzie pracy.

Uchwała umożliwi zdobycie tytułu inżyniera licznym rzęszom pracowników zakładów pracy, położonych daleko od najbliższej wieczorowej szkoły inżynierskiej.

Dla zabezpieczenia prawidłowego przebiegu studiów Uchwała przewiduje, że w ośrodkach przemysłowych, w których będzie nie mniej niż 15 studentów studiów zaocznych, będą utworzone punkty konsultacyjne, podległe właściwym wyższym szkołom technicznym i organizowane przy współudziale terenowych stowarzyszeń naukowo-technicznych NOT.

Nowe kierunki studiów zaocznych z dziedziny elektrotechniki będą uruchomione z dniem 1.IX.55 w politechnikach: w Warszawie, Łodzi, Gdańsku, Gliwicach, Wrocławiu oraz w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Kandydaci mający wykształcenie średnie mogą ubiegać się o przyjęcie na studia, jeżeli: 1) uzyskają skierowanie zakładowej komisji rekrutacyjnej, 2) nie przekroczyli 40 lat życia, 3) złożą z wynikiem pomyślnym egzamin wstępny. W uzasadnionych przypadkach może być przyjęty na studia kandydat, który ukończył 40 lat życia.

Pierwszeństwo w przyjęciu na studia mają kandydaci, którzy wykazą się dłuższą niż jednoroczną pracą zawodową w produkcji, zgodną z obranym kierunkiem studiów.

W sprawach związanych z rekrutacją rektoraty wyższych szkół technicznych, jak politechniki, szkoły inżynierskie, wieczorowe szkoły inżynierskie oraz placówki terenowe NOT są w posiadaniu odpowiednich wytycznych i wskazówek Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego.

Rozpoczęcie rekrutacji w zakładach pracy przewidziane jest w styczniu 1955 r., a zakończenie w dniu 31 marca 1955 r.

Studia zaoczne trwają 5 lat.

Sprostowanie do zesz. 2/3 PE z 21.III.55

Tytuł rozdz. 6 na str. 61 (lewy łam u góry) powinien mieć brzmienie następujące:

6. Obliczanie wartości szczytowej przepięć w kanałach międzycewkowych.

Redaktor naczelny inż. Tadeusz Czaplicki, — Wydawca: Naczelna Organizacja Techniczna. — Adres Redakcji i Administracji: Warszawa, Czackiego 3/5, tel. 674-61, wewn. 18.1

Nakład 8.050. Ark. druk. 6. Papier ilustr. kl. V, 70 g, 86 × 122/16. Oddano do składania 25.II.55. Podpisano do druku 28.IV.55. Druk ukończono 30.IV.55. Drukarnia im. Rewolucji Październikowej, Warszawa. Zam. 255c/55. B-6-4498.

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN

MINISTERSTWA ENERGETYKI, MINISTERSTWA PRZEMYSŁU MASZYNOWEGO,
STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

Redaktor naczelny inż. Tadeusz Czaplicki. — Redaktorzy działów inżynierowie: Stanisław Andrzejewski, Janusz Gniewiewski,
Leszek Zienkowski, Tadeusz Żarnecki

Rok XXXI

Warszawa, 21 kwietnia 1955 r.

Zeszyt 4

Wyzyskanie energii atomowej jest dla ludzkości koniecznością

Energia atomowa stała się przedmiotem zainteresowania całego świata. Pisma wszystkich krajów — nie wyłączając gazet — podają stale wiadomości o nowych wynikach badań i doświadczeń. Niestety, w sprawie doświadczeń słyszało się głównie o amerykańskich eksperymentach z bombą atomową czy też wodorową, o atomowym napędzie łodzi podwodnej, słowem o wyzyskaniu energii jądrowej do celów wojennych. Dopiero radziecki komunikat o uruchomieniu pierwszej na świecie elektrowni atomowej typu przemysłowego skierował dyskusję na inne tory, na tory wyzyskania energii jądrowej do celów pokojowych, do wytwarzania energii elektrycznej.

Na ten temat pisze się obecnie coraz więcej i obecnie dowiadujemy się już nie o oderwanych od życia projektach, lecz o konkretnych zamierzeniach. Anglia ma zamiar uruchomić wkrótce pierwszą elektrownię atomową. Również i w Stanach Zjednoczonych rozpoczęto budowę większej elektrowni atomowej. Można byłoby przypuścić, że jest to moda względnie międzynarodowa rywalizacja w rodzaju wyścigu w budowie coraz większych statków transatlantycznych w okresie międzywojennym.

Rzut oka na obecne światowe zużycie energii wykazuje, że sprawa ma podkład głębszy, że poszukiwanie nowych źródeł energii jest koniecznością.

Roczne światowe wydobycie węgla przekroczyło już 1600 mln ton, wydobycie ropy 600 mln ton, gazu ziemnego 300 mld metrów sześciennych, a produkcja energii elektrycznej zbliża się do $1,5 \cdot 10^{12}$ kWh.

Środki transportu powietrznego, lądowego i morskiego zużywają praktycznie całe wydobycie paliw płynnych. Zupełne bezpieczeństwo i wielka szybkość komunikacji lotniczej sprawiła, że jest ona bezkonkurencyjna, zwłaszcza na dalsze odległości; toteż rozwój jej jest niezwykle szybki i samolot wypiera wielkie pasażerskie okręty oceaniczne, samochód zaś stał się tak popularnym środkiem transportu bliskiego, że niektóre stolice liczą po kilkaset tysięcy samochodów (Paryż 800 000, Bruksela 500 000). Ropa i mazut są wyłącznym paliwem okrętów nie tylko wojennych; także w marynarce handlowej paliwa płynne zdobyły przewagę nad węglem dzięki szybkości załadunku, łatwiejszej obsłudze i możliwości składowania paliwa płynnego w pomieszczeniach nie nadających się na ładownie węgla. Nic dziwnego, że wydobycie ropy wzrasta nieustannie i podwaja się co 10—12 lat. Stwierdzone zapasy jej wystarczyłyby przy obecnym zużyciu na jakieś 40 lat, jeżeli zaś przyjąć, że zużycie paliwa będzie nadal wykazywało ten sam przyrost co obecnie, a równocześnie uwzględnić zasoby ropy obecnie jeszcze wprawdzie nie stwierdzone, lecz przewidywane, to paliw płynnych wystarczy na ziemi na okres około 50 lat.

Niewiele lepiej jest z zasobami paliw stałych. Powiększająca się stale produkcja przemysłowa zużywa coraz większe ilości energii — zwłaszcza elektrycznej, coraz większy bowiem udział w ogólnej produkcji przemysłowej biorą procesy pochłaniające wybitnie wielkie ilości energii, jak wytwarzanie stali stopowych w piecach elektrycznych, otrzymywanie metali lekkich drogą elektrolizy, wielka synteza chemiczna oraz ostatnio powstała gałąź przemysłu — przemysł atomowy. O wielkości zużycia energii przez zakłady atomowe świadczą to, że wybudowane kosztem miliarda dolarów zakłady separacji dyfuzyjnej nad Ohio będą zużywały 15 mld kWh energii elektrycznej rocznie.

Wyzyskanie energii spadku wód nie wpłynie decydująco na bilans energetyczny świata. Energia wytworzona w elektrowniach wodnych stanowi zaledwie około 1 do 2% zapotrzebowania energii całego świata. Budowa elektrowni wod-

nych jest bardzo powolna, toteż ich procentowy udział w ogólnej wytwórczości energii elektrycznej stale maleje; gdy w r. 1920 w elektrowniach wodnych wytworzono 45% całej wyprodukowanej ilości energii elektrycznej, to w r. 1952 już tylko 35%.

Tak więc głównym źródłem energii dla świata są paliwa, głównym zaś źródłem energii elektrycznej — elektrownie ciepłe przetwarzające energię paliw, przede wszystkim stałych. Wzrost produkcji energii w elektrowniach parowych jest tak szybki, że procentowy przyrost zużycia węgla przez elektrownie jest blisko 2 razy większy niż przyrost produkcji węgla. Wprawdzie w dziedzinie oszczędności węgla osiągnięto imponujące wyniki, ale niewiele wpływa to na zmniejszenie ilości rzeczywiście spalanej paliwa wobec stale pogarszającej się jego wartości opałowej, albowiem zmuszeni jesteśmy spalać coraz mniej wartościowe węgle. Toteż wkrótce staniami wobec faktu, że przyrost zużycia węgla przez elektrownie przekroczy przyrost wydobycia. A przecież energetyka nie jest, bynajmniej jedynym konsumentem węgla. Również poważny wzrost produkcji wykazuje hutnictwo, zużywające coraz większe ilości węgla, w ostatnich zaś dziesięcioleciach pojawił się nowy potężny konsument węgla — wielka synteza chemiczna, przy czym gdy dla energetyki węgiel jest wyłącznym paliwem, dla hutnictwa częściowo paliwem a częściowo surowcem, to dla chemii węgiel jest przede wszystkim surowcem i nie da się niczym innym zastąpić.

Na podstawie powyższego obrazu jasne jest, że wszyscy producenci węgla robią wysiłki dla wzmocnienia jego wydobycia, ale nie zawsze są one uwieńczone pomyślnym wynikiem, jak tego dowodzi przykład Anglii. Przystępuje się więc do eksploatacji pokładów, które dotychczas — ze względu na niską jakość węgla, bądź na trudności wydobycia — były uważane za nienadające się do eksploatacji. Wyczerpywanie się płytszych pokładów zmusza do eksploataowania coraz głębszych utrudniając i podrażając wydobycie. Cena węgla na rynkach światowych nieustannie wzrasta.

Przed światem stoi widmo wyczerpania się zasobów węgla. Przybliżony szacunek, oparty wprawdzie na wielu trudnych do ustalenia współczynnikach, wykazuje, że jeżeli wzrost zużycia węgla zachowa obecny przebieg, to zasoby węgla zostaną wyczerpane w ciągu około 100 lat. To jest zaś okres czasu niezmiernie krótki nie tylko w skali istnienia ludzkości, ale i w skali życia narodu.

Z przedstawionego wyżej obrazu wynika, że oszczędzanie węgla, traktowanie go tylko jako surowca dla hutnictwa i chemii i zastępowanie go tam, gdzie służy on jako paliwo, przez inne źródła energii jest koniecznością. Ludzkość zmuszona jest zatem sięgnąć do innych źródeł energii niż energia spadu wód czy energia paliw.

Szacunek światowych zasobów energii wykazuje, że w stwierdzonych i prawdopodobnych na ziemi ilościach pierwiastków rozszczepialnych — w uranie i torze — zawarte jest przeszło dwadzieścia razy więcej energii niż w węglu. Wyzyskanie zatem energii jądrowej jest palącą koniecznością, odsuwa to bowiem głód paliwa na setki lat. Jest to wprawdzie w skali istnienia ludzkości okres też niezbyt długi, jednakże należy przypuszczać, że w tym okresie człowiek nauczy się wyzyskiwać jeszcze inne źródła energii. Warto na tym miejscu przypomnieć, że w r. 1936 wybitny fizyk atomowy Rutherford powiedział, że w ciągu 100 lat ludzie nie potrafią wyzyskać energii jądrowej. Tymczasem już po dziewięciu latach od tej wypowiedzi nastąpił wybuch pierwszej bomby atomowej. Wtedy znów fizycy Niemiali, że wprawdzie udało się nie spodzianie szybko wyzyskać energię rozpadu jądra, ale opanowanie syntezy jąder atomowych jest rzeczą jeszcze nie-



zmiennie odległą. W niespełna dziewięć lat później nastąpił wybuch bomby wodorowej. Wyzyskanie energii syntezy jąder stało się faktem.

Przykłady te dowodzą, że żyjemy w dobie tak szybkiego postępu nauki i techniki, że nie możemy nawet przewidzieć tego, co jest zupełnie możliwe, a nawet bliskie. Możliwy zaś

jest nie tylko wspaniały rozkwit świata, ale możliwa jest także obecnie jego całkowita zagłada, jeżeli te potężne siły natury, którymi człowiek nauczył się posługiwać, będą użyte nie do budowy, lecz do niszczenia. Wysilek ludzi rozumnych na całym świecie musi być skierowany ku temu, aby energia jądrowa służyła jedynie dobru człowieka.

INŻ. WŁADYSŁAW NEY

Projekty wyzyskania energii atomowej do produkcji energii elektrycznej

(083.9):621.384.6:621.3

Treść. Historyczne i polityczne tło zagadnienia. Fizyczne podstawy praktycznego wyzyskania energii atomowej. Znaczenie izotopów uranu, reakcja łańcuchowa. Reaktory atomowe, zasada działania, klasyfikacja reaktorów. Proces prosty, przetwórczy i wytwórczy w reaktorze. Problemy konstrukcyjne reaktorów; promieniowanie, wymiana ciepła, kontrola i regulacja. Bilans paliwa jądrowego reaktorów atomowych dla różnych procesów. Przykłady projektowanych rozwiązań elektrowni atomowych. Gospodarcze perspektywy energii atomowej na tle oceny wyzyskania światowych zasobów energetycznych. Zasoby paliwa jądrowego. Wnioski.

Проекты использования атомной энергии для производства электрической энергии. Исторический и политический фон вопроса. Физические основы практического использования атомной энергии. Значение изотопов урана, цепная реакция. Атомные реакторы, их принцип действия; классификация реакторов. Простой, перерабатывающий и производственный процессы. Конструкционные вопросы в области реакторов; излучение, обмен тепла, контроль и регулирование. Баланс ядерного топлива в различных процессах. Примеры проектируемых решений в области атомных электростанций. Экономические перспективы атомной энергии в связи с истощением нынешних мировых источников энергии. Ресурсы ядерного топлива. Заключение.

Projects for utilising atomic energy in the production of electric power. Historical and political backgrounds of this problem. Physical fundamentals of practical utilisation of atomic energy. Importance of uranium isotopes; chain reaction. Atomic reactors, principles of operation, reactor classification. Simple, manufacture and production processes in reactors. Problems of reactor design; radiation, heat exchange, control and regulation. Nuclear fuel balance of atomic reactors for various processes. Examples of atomic power plant design. Economic prospects of atomic energy reviewed from the point of utilising world power resources. Nuclear fuel resources. Conclusions.

1. Historyczne i polityczne tło zagadnienia.

Ogłoszony 1 lipca 1954 r. komunikat TASS o uruchomieniu pierwszej przemysłowej elektrowni atomowej w ZSRR musiał odbić się bardzo przyciemnieniem echem w Stanach Zjednoczonych. Pięcioletni plan rozwoju energetyki atomowej, dyskutowany na krajowym zjeździe amerykańskich inżynierów chemików w marcu 1954 r. w Waszyngtonie, przewidywał uruchomienie pierwszej elektrowni przemysłowej w USA „w okresie pięcioletnim” bez bliższego podania roku. „Wiadomość o uruchomieniu radzieckiej elektrowni atomowej” — pisała amerykańska agencja United Press — „była dla zachodnich autoritetów atomowych takim samym wstrząsem, jak swego czasu wiadomość o eksplodowaniu w ZSRR bomby atomowej i bomby wodorowej”. Należy stwierdzić, że szereg wybitnych specjalistów atomowych i przemysłowców w USA i w Anglii wyrażał się bardzo sceptycznie o możliwości przemysłowego zastosowania energii atomowej do celów energetycznych wcześniej niż przed upływem 15 — 20 lat.

Epokowy przełom w dziedzinie fizyki, spowodowany poznaniem i opanowaniem wewnątrz-atomowej energii jądrowej w ostatnich dziesięcioleciach, był przygotowany wspólnym wysiłkiem uczonych wielu narodowości. Oto ważniejsze etapy odkryć i postępu: układ periodyczny pierwiastków Mendelejewa w 1869 r., odkrycie promieniotwórczości naturalnej przez Becquerela i dalsze odkrycia w tej dziedzinie dokonane przez Marię Skłodowską i Piotra Curie, teoria względności Alberta Einsteina, ustalająca związek pomiędzy pojęciem masy i energii, dokonanie w roku 1919 przez Rutherforda pierwszej reakcji jądrowej przemiany pierwiastków, odkrycie w 1932 r. przez Chadwicka neutronu, a w 1939 r. odkrycie przez Hahna i Strassmanna rozszczepienia jądra uranu na skutek pochłonięcia neutronów (stwierdzenie możliwości powstawania reakcji łańcuchowej), wreszcie odkrycie w tymże roku przez Flerowa i Pietrzaka zjawiska samoradnego rozpadu uranu.

Na początku wojny znalazła się w Stanach Zjednoczonych grupa najwybitniejszych fizyków atomowych — emigrantów politycznych z krajów okupowanych lub zagrożonych, a przede wszystkim E. Fermi z Włoch, Niels Bohr z Danii, L. Schilard i E. Teller z Węgier, H. Bethe z Niemiec i wielu innych, których nazwiska są związane z praktycznym wyzyskaniem energii atomowej.

W chwili wybuchu II wojny światowej w 1939 r. znane już było zjawisko samoradnego rozpadu jąder uranu i fizycy widzieli realne możliwości wyzyskania energii atomowej.

Wysiłek ZSRR musiał być w tym czasie całkowicie skoncentrowany dokoła problemów bezpośrednio związanych z prowadzeniem wojny. Po zakończeniu wojny Związek Radziecki wykorzystał swe ogromne możliwości, uruchomił wielkie środki materialne i ludzkie dla nadrobienia opóźnienia spowodowanego wojną. W ciągu czterech lat Związek Radziecki skonstruował bombę atomową, w czerwcu 1954 r. popłynął prąd dla przemysłu z pierwszej przemysłowej elektrowni atomowej, kilka lat wcześniej niż przewidywały plany amerykańskie i angielskie.

Wojenne wyzyskanie energii atomowej jest przyczyną, że w prasie i literaturze technicznej nie można znaleźć prac na-

świetlających do głębi całość techniczną zagadnienia. Publikacje dotyczące pokojowego wyzyskania energii atomowej do celów energetycznych są bardzo fragmentaryczne i niekształcone, bądź zupełnie schematyczne, często sprzeczne. Z tego powodu w pracy niniejszej może być przedstawiona raczej strona problemowa zagadnienia, zaznajamiająca czytelnika z trudnościami oraz specjalnymi zagadnieniami z dziedziny fizyki, chemii, metalurgii, które wysuwają się przy rozwiązywaniu problemu praktycznego zastosowania energii atomowej na szerszą skalę w energetyce.

2. Podstawy fizyczne praktycznego wyzyskania energii atomowej.

Przypomnijmy tu, że według naszych wyobrażeń atom dowolnego pierwiastka, ciało elektrycznie obojętne, składa się z dodatnio naładowanego jądra oraz krążących wokół niego elektronów w liczbie odpowiadającej dodatniemu ładunkowi jądra, które z kolei składa się z elektrycznie obojętnych neutronów oraz z protonów, cząstek o masie równej masie jądra wodoru i o ładunku dodatnim, równym ładunkowi elektronu. Jądro najprostszego atomu — wodoru — stanowi właśnie jeden proton. Elektrony atomu są rozmieszczone warstwami; o własnościach chemicznych atomu decyduje układ elektronów w warstwie najbardziej zewnętrznej.

W reakcjach chemicznych pomiędzy pierwiastkami zachodzą procesy tylko pomiędzy elektronami z zewnętrznej warstwy. Praktycznie niemal cała zużywana w przemyśle, transporcie i w gospodarstwie domowym energia, pochodząca ze spalania paliwa, czyli utleniania węgla lub węgłowodorów, jest energią chemiczną, wyzwalamą się przy przegrupowaniu kilku zewnętrznych elektronów atomów węgla, wodoru i tlenu. Jądro atomowe może jednak stać się również źródłem energii. W jądrze każdego atomu koncentruje się z górą 0,9995 jego masy, a znacznie mniej niż 0,0005 masy atomu koncentruje się w krążących wokół niego elektronach.

Odkryta z górą 50 lat temu naturalna promieniotwórczość jest wynikiem samoradnego rozpadu jąder ciężkich pierwiastków uranu i radu; wyzwolona przy tym energia wiązania jądra wydziela się w postaci energii cieplnej (energii kinetycznej) ruchu szybkich cząstek. Ilości energii wyzwalamącej się przy takim rozpadzie poszczególnych jąder są z grubsza milion razy większe od energii wyzwalamącej się przy przegrupowaniach w wiązaniach elektronowych (reakcjach chemicznych).

Liczba atomów, podlegających samoradnemu rozpadowi w zjawiskach naturalnej promieniotwórczości, jest znikoma, proces ten jest bardzo powolny i przyspieszyć go nie można, np. okres rozpadu połowy atomów radu wynosi 1590 lat, odpowiedni zaś okres dla uranu wynosi 4,5·10⁹ lat; dlatego np. 1 kg uranu wydziela drogą promieniowania 0,00017 kcal/h, a 1 kg radu 134 000 kcal/h. W reakcjach chemicznych — odwrotnie — ilość energii wyzwalamącej przypadająca na atom jest znikoma, a ilość atomów biorących udział w reakcji jest ogromna.

Reakcje jądrowe otrzymywano sztucznie w laboratoriach w trzecim i czwartym dziesięcioleciu przy użyciu cząstek (protonów, cząstek alfa), przyspieszanych przy pomocy akce-

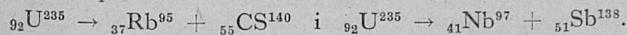
leratorów (cyklotronów, betatronów, kosmotronu), opartych na zastosowaniu silnych pól magnetycznych i zmiennych pól elektrycznych. Reakcje te mają jedynie znaczenie naukowe, dają one znacznie mniej energii niż należy zużyć na ich wywołanie.

Zawartość neutronów i protonów w jądrze daje się łatwo obliczyć. Liczbie porządkowej atomu Z w układzie periodycznym Mendelejewa odpowiada dokładnie ładunek ujemny atomu, czyli liczba krążących dokoła jądra elektronów, a więc i liczba dodatnich protonów musi być równa Z , atom bowiem musi być elektrycznie obojętny, gdyż jego masa koncentruje się niemal całkowicie w jądrze. Masę atomową A , zaokrągloną do liczby całkowitej, odpowiada masie jądra i w jednostkach masy atomowej równa się łącznej liczbie nukleonów (neutronów i protonów) w jądrze (zaokrąglona masa neutronu czy protonu równa jest jednostce), a więc liczba neutronów w jądrze wynosi $n = A - Z$. Z tej zależności wynika, że można sobie wyobrazić kilka wariantów jąder tego samego pierwiastka z różnymi masami atomowymi A i różną zawartością neutronów, spełniających warunek $Z = A - n = \text{const}$, tj. stałej liczby elektronów, co jest koniecznym warunkiem identyczności pierwiastków, identyczności ich chemicznych własności.

Symbol pierwiastka ${}^Z\text{X}^A$ oznacza pierwiastek X o liczbie porządkowej Z oraz masie atomowej A (w skrócie pisze się też X^A). Jądra tego samego pierwiastka, różniące się liczbą neutronów w jądrze, a więc i ciężarem atomowym, nazywamy izotopami. Znamy około 100 pierwiastków chemicznych i ok. 300 ich trwałych jąder, to znaczy, że każdy niemal pierwiastek ma swoje izotopy trwałe.

Na przykład obok zwykłego wodoru ${}^1\text{H}^1$ o ciężarze atomowym 1 występuje w przyrodzie w niewielkich ilościach jego izotop — ciężki wodór o masie atomowej 2 (${}^1\text{H}^2$), zwany też deuterem ${}^2\text{D}$. Daje on z tlenem związek analogiczny do wody, zwany ciężką wodą (D_2O), o własnościach fizycznych nieco różniących się (np. ciężar właściwy ciężkiej wody wynosi 1,017). Najcięższy w naturze pierwiastek — uran — również występuje w postaci dwóch izotopów. Symbol ${}^{92}\text{U}^{238}$ oznacza, że uran ma numer porządkowy 92 w układzie periodycznym oraz masę atomową 238; oznacza to również, że atom uranu jest zbudowany z 92 elektronów, jądro zaś ma 92 protony oraz 238 — 92 = 146 neutronów; drugi — lżejszy — izotop uranu ma tylko 143 neutrony i naturalnie również 92 elektrony i tyleż protonów (dla prostoty stosuje się dla dwu wymienionych izotopów uranu również oznaczenia: U 238 dla cięższego i U 235 dla lżejszego). Oba izotopy występują w przyrodzie w naturalnym uranie jednocześnie w stosunku: lekki 0,7%, ciężki 99,3%.

Szczególnie interesujące są przekształcenia jądra uranu pod działaniem neutronów. Jądro izotopu U 235 po pochłonięciu neutronu rozpada się gwałtownie na dwa odłamki zbliżonej wielkości — jądra lżejszych pierwiastków; wylatują przy tym średnio 2,5 nowe neutrony o prędkości wynoszącej ok. 13 000 km/s i wyzwala się ogromna ilość energii, tzw. energii wewnętrznej wiązania jądra. Energia ta w znacznej części występuje w formie energii kinetycznej odłamków rozpadu. Rozpad jądra uranu może następować w różny sposób, zawsze jednak na parę odłamków tak, że suma ich mas atomowej i liczba elektronów równa się masie atomowej i liczbie elektronów U 235. Znamy obecnie ponad 50 możliwych sposobów rozszczepiania jądra uranu. Oto np. dwie drogi rozszczepienia:



Powstają tu kolejno z rozszczepienia pary pierwiastków — rubid i cez oraz niob i antymon. Najczęściej produktem rozpadu uranu są promieniotwórcze izotopy — o długim czasie trwania — następujących pierwiastków: krypton, stront, cyrkon, niob, ruten, jod, ksenon, cez, bar i cer. Atomy powstałe z ich rozszczepienia posiadają nadmiar neutronów, są to więc radioaktywne izotopy tych pierwiastków.

Wyzwalające się z jądra uranu U 235 przy jego rozszczepieniu wolne neutrony mogą z kolei zaatakować inne atomy uranu i spowodować ich rozszczepienie. Jest to zasada powstawania reakcji łańcuchowej, dająca praktyczną możliwość uzyskania ogromnych ilości wyzwolonej energii w wewnętrznej wiązania jąder w bardzo krótkim czasie. Należy tu mieć jednak na uwadze szereg okoliczności. Tylko lżejszy izotop uranu U 235 podlega rozszczepieniu przez neutrony dowolnej prędkości. Izotop U 238 ulega rozszczepieniu tylko przez neutrony o dużej energii, natomiast pod działaniem

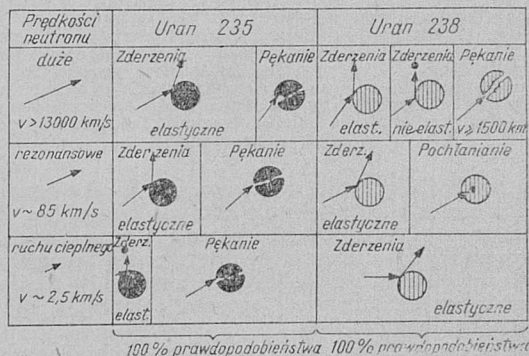
neutronów stosunkowo powolnych powstaje z niego nowy, nie występujący dotąd w przyrodzie, pierwiastek pluton ${}^{94}\text{Pu}^{239}$.

Pluton jest radioaktywny, okres jego półrozpadu wynosi 24 000 lat. Pluton ulega tak samo rozszczepianiu pod wpływem pochłonięcia neutronów jak U 235. Prawdopodobieństwo rozszczepienia jądra U 235 lub Pu 239 zależy od prędkości trafiającego weń neutronu, a mianowicie jest ono największe przy trafieniu jądra uranu lub plutonu neutronem powolnym o prędkości ok. 2,5 km/s, tj. rzędu prędkości bezładnego ruchu cieplnego cząsteczek gazu o temperaturze reaktora według kinetycznej teorii materii.

Ponieważ wyzwalające się w samym procesie rozszczepienia neutrony mają prędkość znacznie wyższą, bo wynoszącą ok. 13 000 km/s, zachodzi konieczność przyhamowywania neutronów, zanim znów zaatakują jądro uranu. Do tego celu stosuje się tzw. spowalniacze (grafit lub ciężką wodę). Po kilkunastu zderzeniach sprężystych neutronu z atomami spowalniacza prędkość neutronu spada do prędkości cieplnej. Oczywiście, spowalniacz nie powinien pochłaniać neutronów, a jądra jego powinny mieć możliwie małą masę atomową, aby przy zderzeniu przejmować od neutronu jak największą ilość ruchu. Własnościom tym odpowiada właśnie deuter zawarty w ciężkiej wodzie.

Neutrony poruszające się w masie uranu znajdującego się w stosie mogą podlegać następującym procesom: 1) zderzenia elastyczne lub nieelastyczne, 2) pochłonięcie neutronu przez jądro U 238 i dalsze przetworzenie w nowy pierwiastek pluton, 3) pochłonięcie neutronu przez jądro U 235 i rozszczepienie jądra U 235 ulega rozszczepieniu po wchłonięciu zarówno szybkiego, jak i powolnego neutronu.

Każde z tych zderzeń ma swoje określone prawdopodobieństwo, zależne od prędkości neutronu oraz od tego, czy neutron zderza się z atomem U 235 czy też U 238. U 235 ulega rozszczepieniu trafiony szybkim i wolnym neutronem. Prawdopodobieństwo rozszczepienia jądra U 235 jest znacznie większe przy zderzeniu z neutronami powolnymi — termicznymi. Ciężki — powszechniej występujący — izotop U 238 podlega rozszczepieniu tylko przy zderzeniu z szybkimi neutronami i to nie zawsze, ponieważ neutrony zderzwszy się z jądrem mogą się tylko od niego odbić sprężysto lub niesprężysto, tracąc wtedy znaczną część swej prędkości. Przy prędkości neutronu wynoszącej ok. 85 km/s (tzw. prędkości rezonansowej) jest duże prawdopodobieństwo, że neutron zostanie przez jądro U 238 pochłonięty i jądro to ulegnie dalszemu przeistoczeniu zamieniając się w końcu w jądro plutonu. Neutrony powolne podlegają tylko zderzeniom sprężystym z jądrami U 238. Na rys. 1 pokazane są możliwości reagowania neutro-



Rys. 1. Zachowanie się jąder U 235 oraz U 238 przy zderzeniu z neutronami o różnych prędkościach

nu z jądrem U 235 lub U 238 z uwzględnieniem prawdopodobieństwa tych reakcji. Skalę prawdopodobieństwa na rys. 1 należy rozumieć jedynie orientacyjnie. Prawdopodobieństwo rozszczepienia U 235 neutronem termicznym jest ok. 100 razy większe niż neutronem szybkim.

3. Reaktory atomowe.

Reaktory atomowe wyzwalają — w przeciwieństwie do bomby atomowej — w sposób powolny i regulowany energię cieplną uzyskiwaną z rozszczepienia atomów paliwa jądrowego przy reakcji łańcuchowej. Zastąpienie w elektrowni cieplnej kotła parowego reaktorem atomowym stanowi elektrownię atomową.

Warunkiem utrzymania reakcji łańcuchowej jest wytwarzanie dostatecznej liczby neutronów, powodujących odpo-

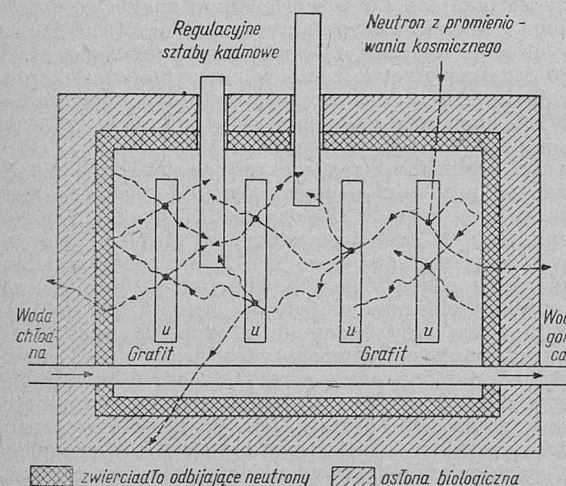
wiednią liczbę reakcji rozpadu. Nie wszystkie neutrony wywołone przy rozszczepieniu jąder powodują dalsze reakcje rozszczepiania, gdyż niektóre neutrony uchodzą z masy uranu na zewnątrz nie powodując reakcji. Stąd wypływa konieczność stworzenia dostatecznie wielkiej masy uranu, aby zmniejszyć straty neutronów; z tym wiąże się pojęcie wielkości krytycznej rdzenia reaktora. Dla dalszego zmniejszenia strat, tj. rozproszenia neutronów, reaktor jest otoczony płaszczem odbijającym neutrony lub zwierciadłem.

Dalsze straty neutronów w reaktorze powoduje pochłanianie ich przez uran U^{238} oraz przez wszelkie zanieczyszczenia chemiczne elementów konstrukcyjnych reaktora. Gdy reakcja łańcuchowa rozwija się zbyt gwałtownie, tj. moc reaktora wzrasta i temperatura w nim nadmiernie się podnosi, wywołuje się wtedy sztuczne pochłanianie wielkiej ilości neutronów przez wsuniecie do reaktora prętów regulacyjnych z materiałów silnie pochłaniających neutrony.

Schemat procesu neutronów zachodzącego w reaktorze typu niejednorodnego pokazany jest na rys. 2.

Istnieje obecnie bardzo wiele typów reaktorów atomowych według ich przeznaczenia:

a) do celów badawczo-naukowych oraz do rozwiązywania w skali laboratoryjnej pewnych problemów dotyczących kon-



Rys. 2. Schemat działania reaktora atomowego

Neutron z promieniowania kosmicznego rozszczepia pierwsze jądro uranu. Wyzwalające się przy tym 2-3 neutrony powodują rozszczepienie jąder uranu znajdujących się w sąsiednich sztabkach uranowych. Grafity znajdujące się pomiędzy sztabkami uranowymi zwalniają neutrony z 13 000 km/s do 2-3 km/s, tj. do prędkości, przy której istnieje największe prawdopodobieństwo procesu rozszczepienia. Wytwarzające się ciepło odprowadza woda chłodząca przepływająca przez reaktor. Sztabki kadmowe służą do pochłaniania neutronów, jeśli proces rozszczepiania (reakcja łańcuchowa) postępuje zbyt intensywnie

strukcji wielkich reaktorów atomowych w skali przemysłowej: bada się tu zachowanie się różnych materiałów w atmosferze silnego promieniowania gamma i przy intensywnym bombardowaniu neutronami, rozwiązuje się specjalne problemy techniczne dotyczące doboru materiałów konstrukcyjnych, czynnika chłodzącego i sposobu chłodzenia, spowalnicza, regulacji reaktora itd.;

b) do produkcji izotopów radioaktywnych dla medycyny i przemysłu;

c) do produkcji materiałów rozszczepialnych, (a przede wszystkim plutonu), mających zastosowanie w bombach atomowych;

d) do celów energetycznych, tj. do produkcji ciepła i energii elektrycznej w elektrowniach i elektrociepłowniach;

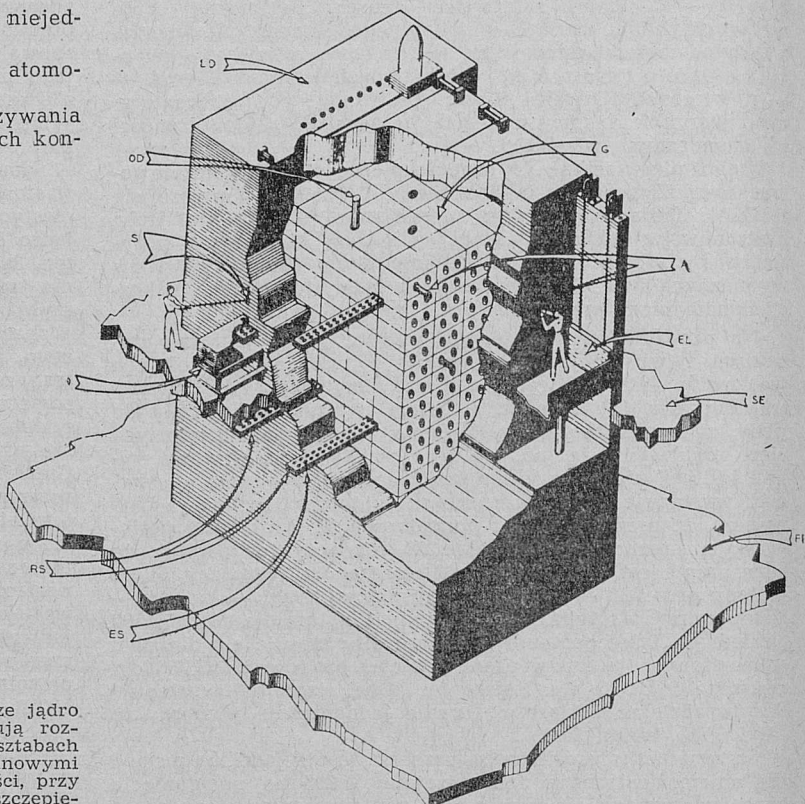
e) do celów transportowych (silniki atomowe dla okrętów, samolotów).

Do celów wymienionych w punkcie a) służą reaktory o małej mocy; produkcję izotopów radioaktywnych można najpewniej powiązać ze wszystkimi reaktorami do wymienionych wyżej celów w pewnym stopniu nawet z reaktorami do celów transportowych. Produkcja materiałów do bomb atomowych oraz cele energetyczne wyłączają się wzajemnie, gdyż w reaktorach energetycznych używane są jako paliwo atomowe właśnie i izotop uranu U^{235} oraz pluton stanowiący materiał wybuchowy w bombie atomowej, tzn. cel produkcji reaktora.

Jedną z możliwych klasyfikacji reaktorów atomowych, uwzględniającą ich różnice konstrukcyjne oraz własności procesu technologicznego, jest następująca:

- 1) reaktory niejednorodne lub jednorodne,
- 2) reaktory z procesem prostym przetwórczym lub wytwórczym,
- 3) reaktory wydzielające proces z neutronami szybkimi lub powolnymi — termicznymi,
- 4) reaktory chłodzone wodą, powietrzem, gazem lub płynnym metalem *).

W reaktorze niejednorodnym spowalnicza paliwa jądrowego i czynnik chłodzący są wyraźnie oddzielone od siebie. Najprostszym reaktorem niejednorodnym jest wykonany jako przestrzenna siatka sztab uranowych, umieszczonych w masie grafitu spowalnicza (rys. 3). Dla przykładu można podać pewne wielkości charakterystyczne reaktora Uniwersytetu w Harwell (Anglia). Reaktor stanowi sześćcian, zawiera-



Rys. 3. Reaktor niejednorodny ze spowalniczem grafitowym

- | | |
|---|---|
| A — rury aluminiowe z uranem | LD — osłona betonowa |
| D — ochronny płaszcz ołowiany | OD — pręt regulacyjny ze stali borowej lub kadmowy |
| EL — dźwig | ES — długie trzymadła grafitowe |
| ES — otwory na aluminiowe pułapki z izotopami | RS — wydobycie rur aluminiowych, zawierających izotopy radioaktywne |
| F — I piętro | S — drugie piętro |
| G — spowalnicza (moderator) | |

jący 800 t grafitu, w którym rozmieszczono 40 t uranu w formie sztab o średnicy 25 mm; osłona betonowa ma około 2 m grubości; moc cieplna reaktora ok. 3,5 Gcal/h (co odpowiada 4000 kW). Ciepło to wykorzystane jest do celów ogrzewniczych. Moc reaktorów jest podawana w prasie technicznej anglosaskiej przeważnie w kilowatach, co może wprowadzić w błąd, ponieważ reaktory wytwarzają energię cieplną, a większość ich nie może praktycznie służyć do wytwarzania energii elektrycznej w zwykłym silniku cieplnym ze względu na zbyt niską temperaturę reaktora. Np. w podanym wyżej reaktorze najwyższa temperatura prętów uranowych wynosi 200°C, a powietrza chłodzącego ok. 95°C.

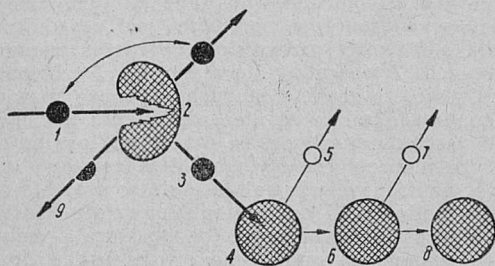
Przez zastosowanie jako spowalnicza ciężkiej wody (D_2O) zamiast grafitu można zmniejszyć znacznie wymiary reaktora, ciężka woda jest jednak bardzo trudnym do otrzymania i kosztownym produktem, koszt jej wynosi obecnie ok. 200 dolarów za kilogram.

*) Por. Wołczek O. Stosy atomowe i możliwości zastosowania ich do wytwarzania energii elektrycznej (PE, 1952, z. 9, str. 353) oraz Wołczek O. Reaktory jądrowe do wytwarzania energii elektrycznej (zeszyt niniejszy, str. 295).

W reaktorze j e d n o r o d n y m przemieszane są — przeważnie w postaci roztworu — wszystkie trzy zasadnicze elementy reaktora, a mianowicie paliwo jądrowe, spowalniacz i czynnik chłodzący. Reaktor stanowi zbiornik, w którym znajduje się roztwór soli uranu w ciężkiej wodzie, stanowiącej jednocześnie spowalniacz i czynnik chłodzący.

Układ taki ma szereg zalet: nie ma kłopotu z korozją sztab uranowych, łatwiej jest doprowadzić świeże paliwo na miejsce zużytego, zbędne są skomplikowane manipulacje mechaniczne z wymianą sztab uranowych. Roztwór pompuje się do powierzchniowego wymiennika ciepła, w którym odbiera się ciepło wytworzone w stosie.

Druga grupa w podanej wyżej klasyfikacji reaktorów uwzględnia stopień wyzyskania paliwa jądrowego w reaktorze. W procesie p r o s t y m może być zużyty tylko uran rozszczepialny U 235, występujący w uranie naturalnym w stosunku 1 : 140. Szereg czynników wpływa na to, że tylko



Rys. 4. Schemat reakcji jądrowej powstawania plutonu w reaktorze atomowym

Wyrzucony neutron zastępuje neutron, który spowodował rozszczepienie. Część neutronów uchodzi na zewnątrz, część jest rozproszona bezużytecznie, część jest pochłonięta przez U238 i wytwarza pluton.

część zawartego w naturalnym uranie izotopu U 235 ulega rozszczepieniu. Konieczność utrzymania pewnej ilości U 235 powyżej ilości krytycznej ze względu na potrzebę podtrzymania reakcji, zanieczyszczenie paliwa jądrowego produktami rozszczepiania wzrastające w miarę postępowania reakcji, strata neutronów przez rozproszenie i pochłanianie pasożytnicze powodują, że mniej więcej ok. 0,4%, tj. 50 do 60% całego U 235 udaje się „spalić”, tzn. poddać procesowi rozszczepienia. Reszta U 235 oraz cały U 238 muszą być z reaktora usunięte jako produkty zużyte. Jeden kilogram naturalnego uranu w takim procesie może zastąpić ok. 9 ton umownego paliwa.

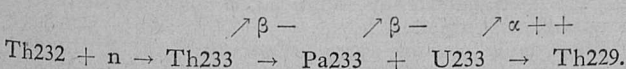
W reaktorze pracującym w procesie p r z e t w ó r c z y m wykorzystana jest reakcja neutronów zwolnionych do szybkości rezonansowej (85 km/s) z izotopem U 238, który w dwóch kolejnych przemianach promieniotwórczych przekształca się w pluton Pu 239, materiał równie łatwo rozszczepialny jak uran U 235.

Na rys. 4 podano schemat przebiegu reakcji tworzenia się plutonu w reaktorze przetwórczym. Wydajność reakcji wynosi 0,8 jednostek plutonu na każdą rozszczepioną jednostkę U 235. W ten sposób znacznie wzrasta ilość rozszczepialnego materiału w reaktorze, a mianowicie z każdej jednostki rozszczepialnego U 235 całkowita ilość materiału rozszczepialnego po dostatecznie długim czasie wyniesie

$$1 + 0,8 + 0,8^2 + \dots = 5.$$

Ponieważ zawartość U 235 wynosi w naturalnym uranie 0,7%, to przy zastosowaniu procesu przetwórczego ilość paliwa użytecznego wzrosła pięciokrotnie (tj. do 3,5%), a zatem 1 kg uranu naturalnego po wyzyskaniu go w procesie przetwórczym może zastąpić ok. 45 t paliwa umownego. Oczywiście, proces ten wymaga przejściowej rafinacji chemicznej załadowanego do reaktora uranu, zanim zużyje się wyżej obliczone 3,5% paliwa.

Zamiast uranu U 238 można zastosować tor, który pod wpływem promieniowania neutronowego ulega przemianom (transmutacjom) jądrowym, dając w końcu nowy, niewystępujący w przyrodzie, rozszczepialny izotop uranu U 238. Przemiana ta ma następujący przebieg:



23 minuty 27,4 doby 160000 lat

W ten sposób sztucznie otrzymany U 233 jest pierwiastkiem

rozszczepialnym o własnościach podobnych do U 235 oraz do Pu 239.

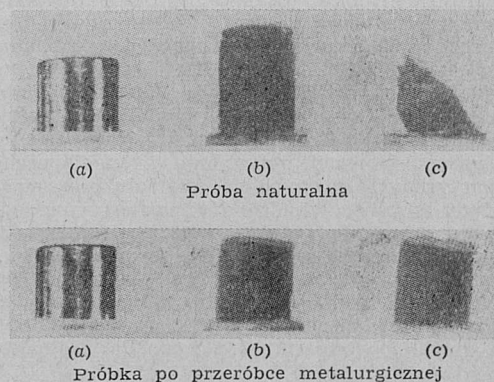
Jeżeli w procesie przetwarzania U 238 w Pu 239 uda nam się uzyskać współczynnik wyższy od jedności w stosunku do zużytego U 235, otrzymamy w wyniku więcej paliwa niż go zużyliśmy w reaktorze. Będzie to właśnie proces w y t w ó r c z y, dający najwyższy stopień wyzyskania paliwa jądrowego, a więc najbardziej obiecujący pod względem energetycznym. Teoretycznie można by w tym procesie wyzyskać cały ładunek uranu naturalnego, tj. 140 razy więcej niż w procesie prostym. Zastosowanie procesu wytwórczego w skali przemysłowej stwarza ogromne możliwości w rozszerzeniu światowych zasobów energetycznych, wiąże się jednak z dużymi komplikacjami z powodu konieczności prowadzenia równoległe ciągłej chemicznej przeróbki paliwa jądrowego załadowanego reaktora. Pierwsza uruchomiona w St. Zjednoczonych elektrownia atomowa na skalę laboratoryjną o mocy 250 kW została wykonana z zastosowaniem reaktora typu wytwórczego.

Reaktory, wyzyskujące proces z neutronami szybkimi, w ogóle nie mają spowalniacza; neutrony bezpośrednio otrzymywane po rozszczepieniu, mające więc prędkość rzędu 13000—15000 km/s, wstępują w nich w reakcję z jądrami paliwa atomowego. Rozszczepieniu ulegają wtedy jądra nie tylko U 235, lecz również U 238. Reaktory wyzyskujące proces z neutronami „termicznymi” zawierają spowalniacz zwalniający neutrony do szybkości termicznej, przy której rozpadowi ulegają tylko jądra atomów U 235. Zjawiska rozszczepienia mają określone prawdopodobieństwo; w reaktorze z neutronami powolnymi zachodzą również rozszczepienia przez neutrony szybkie i, odwrotnie, w reaktorze z neutronami szybkimi zachodzą również rozszczepienia przez neutrony powolne, prawdopodobieństwo takich procesów jest jednak bardzo małe.

Reaktory można także podzielić na różne typy według zastosowanego w nich czynnika chłodzącego; można zastosować gazy obojętne, jak np. hel, powietrze, dwutlenek węgla, wodę zwykłą lub ciężką, metale lekkie, sól i potas oraz rtęć.

Zatrzymamy się pokrótce na trzech zasadniczych problemach, związanych z konstrukcją i pracą reaktora.

a) P r o m i e n i o w a n i e w y s t ę p u j ą c e w r e a k t o r z e. W procesie rozszczepiania, przebiegającym wewnątrz reaktora, wywiązują się silnie promieniotwórcze produkty rozszczepienia, wydzielające neutrony i promienie γ . Podczas samego rozszczepiania paliwa jądrowego



Rys. 5. Zmiany fizyczne, którym ulega próbka paliwa jądrowego wskutek intensywnego działania promieniowania w reaktorze

- (a) — przed wprowadzeniem do reaktora
- (b) — po pewnym czasie pozostawiania w reaktorze
- (c) — po dwukrotnie dłuższym pozostawianiu w reaktorze

część wyzwolonej energii w ilości ok. 2,5% wydzielają się w postaci promieni β (swobodnych elektronów), a około 10% w postaci promieni γ oraz innych rodzajów promieniowania. Odkładki rozszczepionych jąder wbijają się z ogromną prędkością w elementy konstrukcyjne reaktora, sztaby uranowe, osłony aluminiowe, konstrukcje stalowe przetwarzając swą ogromną energię kinetyczną w ciepło, powodując zmiany nie tylko ich właściwości fizycznych, wytrzymałości, przewodności itp., lecz powodując również silną korozję — zmianę ich kształtów. Na rys. 5 pokazany jest np. wpływ promieniowania panującego wewnątrz reaktora na sztaby paliwa jądrowego.

Promieniowanie jest zabójcze dla życia, konieczne więc jest stosowanie silnej osłony biologicznej. Wszelkie operacje, związane z wymianą paliwa i przeniesieniem produktów zużytych z reaktora do zakładu przeróbki chemicznej, muszą odbywać się z zastosowaniem sterowania zdalnego. Proces technologiczny musi być w zupełności zautomatyzowany, a personel obsługujący ograniczony liczbowo do minimum.

b) Wymiana ciepła i chłodzenie reaktora. Z reaktora odprowadza się znaczne ilości ciepła i to przy parametrach odpowiednich dla celów energetycznych, przy czym należy odizolować czynnik cieplny bezpośrednio wprowadzony do turbiny parowej od silnie promieniotwórczego czynnika krążącego w reaktorze. Osiąga się to przez zastosowanie 2- lub 3-stopniowych wymienników. Czyn-

Tablica I

	Względna chłonność neutronów (10 ³ na cm ³)	Średni strumień cieplny kcal/m ² · h	Ilość czynnika do pompowania (kg/min. MW)	Powierzchnia wymiennika (m ² /MW)
Hel pod ciśnieniem 140 ata	0	135 000	18,5	6,3
Woda zwykła	22	1 350 000	142	0,6
Woda ciężka	0,06	1 350 000	142	0,6
Sód	11	5 400 000	225	0,15
Bismut	3	1 350 000	2500	0,6

nik energetyczny odprowadzający ciepło bezpośrednio z reaktora musi pochłaniać jak najmniej neutronów, mieć dużą pojemność cieplną, szybko znikającą wtórną radioaktywność. Czynnikiem bezpośrednio wprowadzanym do turbiny jest we wszystkich wykonywanych i projektowanych instalacjach para wodna.

Charakterystyka czynników chłodzących stosowanych w reaktorach atomowych energetycznych jest podana w tabl. I.

W energetycznych reaktorach atomowych znalazł szerokie zastosowanie jako czynnik chłodzący metal sód (Na). Specjalne właściwości fizyczne sodu, dzięki którym może on być dobrym czynnikiem chłodzącym, są następujące: względnie mała chłonność neutronów, niska temperatura topienia (87⁰C), wysoka temperatura wrzenia (880⁰C), duża przewodność cieplna, niskie ciśnienie pary, duża pojemność cieplna, mała lepkość, mała gęstość. Dzięki tym cechom sód może przenosić więcej ciepła na 1 kg w porównaniu z innymi metalami, co daje oszczędność na pompowaniu; wykazuje małą agresywność w stosunku do stali stopowych. Sód płynny jako metal może być pompowany przy pomocy specjalnych pomp elektromagnetycznych opartych na działaniu pola magnetycznego na prądy wirowe, wzbudzone w masie płynnego metalu. Pompy te nie zawierają żadnych części wirujących, dławic, uszczelnień i są wskutek tego bardzo pewne w ruchu. Wtórna radioaktywność sodu jest dość trwała — okres półrozpadu dla radioaktywnego sodu wynosi 15 godzin, potrzeba zatem tygodni, aby radioaktywność ta spadła do granic dopuszczalnych. Dla zwykłej wody okres półrozpadu radioaktywnych

Tablica III

	Względna chłonność neutronów na cm ³	Względna chłonność dla rury o tej samej wytrzymałości przy 20°C	Punkt topnienia (°C)
Magnez (Mg)	3,5	10	650°
Aluminium (Al)	13	102	660°
Stal stopowa	226	234	1500°
Cyrkon (Zr)	12,6	16	1820°

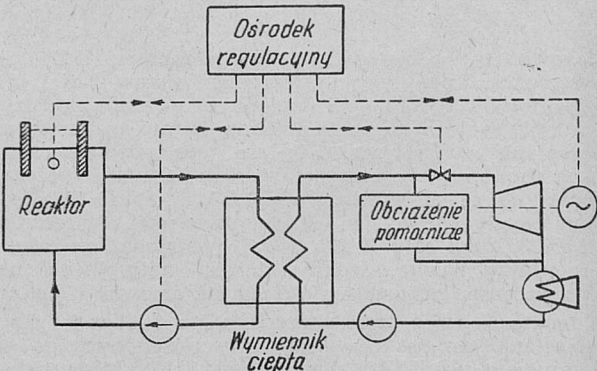
produktów wynosi tylko ok. 8 sek. Obieg pierwotnego medium chłodzącego, stykającego się bezpośrednio w rdzeniu reaktora z uranem, musi być zatem również za osłoną betonową odpowiedniej grubości — podobnie jak sam reaktor, aby uchronić załogę przed działaniem promieniowania. Do turbiny doprowadza się parę otrzymaną w wymienniku cieplnym

ogrzewanym medium pierwotnym. Przy zastosowaniu wody zwykłej lub ciężkiej, jako pierwotnego medium chłodzącego reaktor, cały obieg powinien znajdować się pod dostatecznie wysokim ciśnieniem, aby zapobiec wrzeniu i parowaniu wody w reaktorze. Stanowi to dodatkową trudność konstrukcyjną, gdyż cały reaktor musi znajdować się w kotle wytrzymałym na ciśnienie rzędu kilkudziesięciu atmosfer.

Materiał wymienników ciepła musi również odpowiadać specjalnym wymaganiom: powinien wykazywać małą chłonność neutronów, dużą wytrzymałość oraz odporność na korozję danego czynnika chłodzącego. Z tabl. II widać bardzo korzystnie wyróżniające się własności cyrkonu: małą chłonność neutronów przy dużej wytrzymałości. Metal ten ma dużą przyszłość w możliwości zastosowania w energetyce atomowej.

c) Kontrola pracy reaktora. Zagadnienie regulowania pracy reaktora, tj. intensywności przebiegającej w reaktorze reakcji łańcuchowej, a co za tym idzie regulowania mocy wywiązanej w reaktorze, jest zasadniczym warunkiem dla możliwości przemysłowego zastosowania reaktorów atomowych. Z początku obawiano się „rozbiegania się” reaktora, tj. tego, że reakcja łańcuchowa może rozwinąć się zbyt szybko, że reaktor może ulec roztopieniu lub nawet eksplozji. Dziś jest rzeczą pewną, że pracę reaktora można kontrolować i że niebezpieczeństwo takie może być usunięte. Pewną część neutronów, wyzwalającą się w procesie rozszczepienia jąder uranu U 235 lub plutonu, powstaje właśnie z radioaktywnych odłamków rozszczepionego jądra — neutrony te zjawiają się z pewnym opóźnieniem w stosunku do samego procesu rozszczepienia i nadają całemu procesowi pewną bezwładność.

Na schematycznym rys. 6 podane są zasadnicze elementy, na które musi oddziaływać układ regulacyjny elektrowni ato-



Rys. 6. Schemat regulacji elektrowni atomowej

mowej. Od strony samego reaktora regulowane są dwie wielkości: intensywność reakcji łańcuchowej przy pomocy kadmowych sztab regulacyjnych i pochłaniających neutrony oraz ilość pierwotnego czynnika chłodzącego, przepływającego przez reaktor. Pozostałe elementy — położenie zaworu regulacyjnego na dopływie pary do turbiny oraz regulacja pracy generatora — są typowe dla każdej elektrowni parowej. Charakterystyczną cechą reaktora jest to, że nie może mieć mocy równej zeru, gdyż musi się w nim wywiązywać pewna ilość energii wobec powstania w nim — natychmiast po zmontowaniu reaktora — reakcji łańcuchowej; nawet w krańcowym położeniu sztab regulacyjnych istnieje pewien strumień neutronów podtrzymujący reakcję. Stos musi więc zawsze mieć pewne obciążenie pomocnicze, włączane automatycznie na wypadek odłączenia generatora od sieci. Przy zastosowaniu chłodzenia przy pomocy płynnego metalu dodatkowe trudności są związane z utrzymaniem go w stanie płynnym oraz z rozruchem elektrowni.

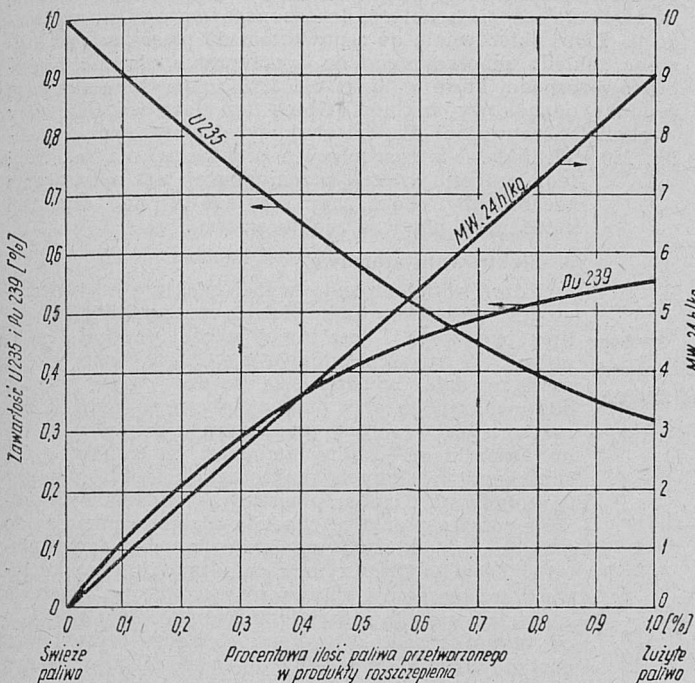
4. Bilans paliwowy dla zasadniczych procesów stosu atomowego.

a) Bilans energetyczny rozszczepienia uranu. Z rozpadu jądrowego jednej gramocząsteczki (235 gr) lekkiego izotopu uranu 235 U otrzymujemy:

masa odłamków rozpadu	234,8
masa elektronów (energia promieniowania β)	0,005
kinetyczna energia odłamków jąder	0,172
energia promienista (promienie γ i inne rodzaje)	0,023
masa gramocząsteczki przed rozpadem	235,0 g

Jak widzimy, tylko ok. 2,5% energii rozpadu wydzielą się w postaci wolnych elektronów, stąd mała nadzieja na bezpośrednie przekształcanie na wielką skalę energii rozpadu jąder w energię elektryczną.

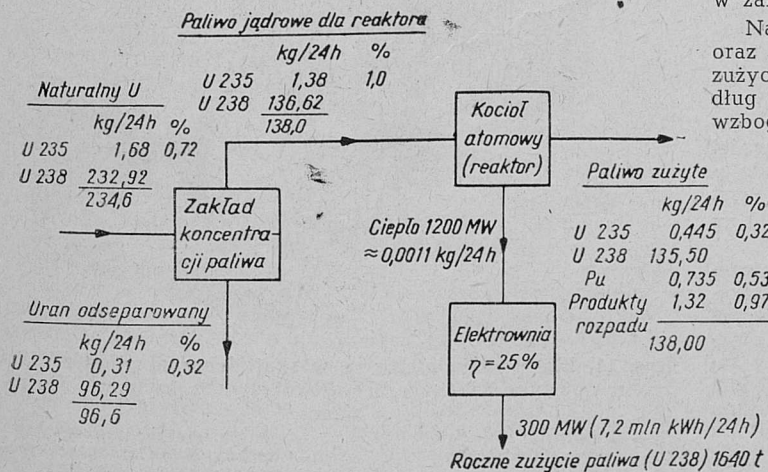
Z bilansu powyższego wynika, że w procesie rozpadu gramodrobiny U 235 energia odpowiadająca 0,2 g masy bezwzględnej jąder przekształca się bezpośrednio w energię kinetyczną i promienistą. Ilość energii odpowiadająca przekształconej



Rys. 7. Zmiana koncentracji U 235 oraz Pu 239 w reaktorze przy procesie prostym i przetwórczym w miarę zużycia paliwa

w energię masie bezwzględnej 0,2 g obliczamy z zależności Einsteina $E = mc^2$ ergów, gdzie m — masa (g), c — prędkość światła $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, a zatem 1 g masy bezwzględnej odpowiada $9 \cdot 10^{20}$ ergów = $9 \cdot 10^{13}$ Ws = 21 500 Gcal.

10 kg uranu naturalnego metalicznie czystego zawiera 0,7%, to jest 70 g lekkiego izotopu 235 U, podlegającego zjawie-



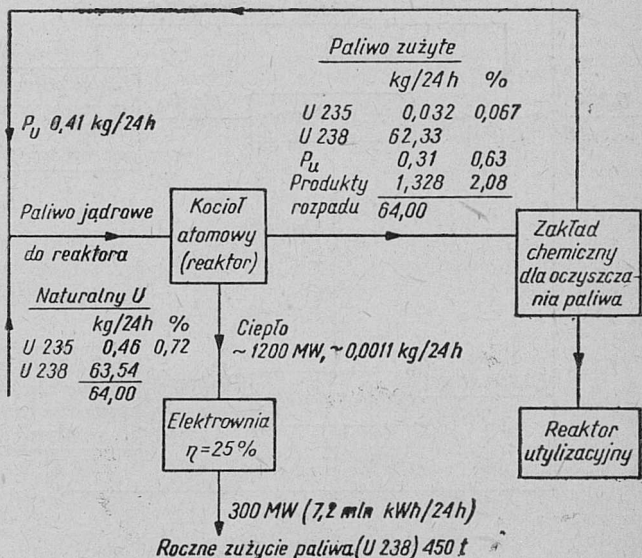
Rys. 8. Bilans paliwa elektrowni atomowej o mocy 300 MW dla procesu prostego bez regeneracji paliwa (paliwo jądrowe — słabo skoncentrowany U 235)

sku rozszczepienia. W zwykłym reaktorze rozpadowi ulega ok. 40 g uranu 235 U, przy czym przekształceniu w energię podlega ok. 0,034 g masy bezwzględnej, co stanowi 730 Gcal energii cieplnej. Około 15% tej energii zużywa się w materii, z której zbudowany jest reaktor, na wtórne procesy promieniotwórcze i transmutacje pierwiastków tak, że 85%, tj. ok.

620 Gcal można wyzyskać jako bezpośrednią energię cieplną, co odpowiada wartości opałowej ok. 90 t paliwa umownego.

W przeciętnej nowoczesnej elektrowni kondensacyjnej o sprawności $\eta = 25\%$ ze „spalenia” tej ilości paliwa jądrowego można otrzymać ok. 180 000 kWh. Skutek nawet w zwykłym reaktorze będzie o $\sim 30\%$ większy ze względu na wytwarzanie w reaktorze rozszczepialnego plutonu.

b) Obieg prosty, nieregeneracyjny, występuje w najczęściej obecnie stosowanym reaktorze „termicznym”, opierającym się na działaniu neutronów doprowadzonych do prędkości cieplnej ($v = 2,2$ km/s). Zmniejszenie prędkości neutronów odbywa się, jak wyjaśniono wyżej, przy pomocy spowalniacza z grafitu lub ciężkiej wody.



Rys. 9. Bilans paliwa elektrowni atomowej o mocy 300 MW dla procesu przetwórczego z częściową regeneracją paliwa (uranu naturalnego chemicznie czystego)

Dla reaktorów ze spowalniaczem grafitowym jako paliwo stosuje się uran wzbogacony nieco w izotop U 235 do wartości ok. 0,92%.

Dla potaniania całej instalacji dąży się do tego, żeby paliwo atomowe było pozostawione w reaktorze pęty, póki reakcja łańcuchowa przebiega jeszcze dostatecznie energicznie, a następnie było usunięte jako odpad bez dalszej przeróbki w zakładzie chemicznym.

Na rys. 7 podany jest przebieg zmian koncentracji U 235 oraz Pu 239, zachodzących w paliwie reaktora w miarę jego zużycia. W trakcie pracy reaktora zawartość U 235 spada według krzywej wykładniczej od 1% (w reaktorze z uranem wzbogaconym w U 235) do 0,32%. W tym samym okresie tworzy się pluton (Pu) jako wynik pochłaniania neutronów przez U 238. Zawartość plutonu ustala się na wartości $\sim 0,6\%$ kiedy to następuje równowaga między ilością nowotworzącego się i rozszczepiającego się plutonu.

Na rys. 8 podany jest bilans paliwowy elektrowni atomowej pracującej na zwykłym nieregeneracyjnym obiegu. Dla uzyskania mocy elektrycznej 300 MW w ciągu 24 h — przy sprawności elektrowni wynoszącej 25% — reaktor musi mieć moc (wydajność cieplną) 1200 MW. Reaktor zużywa na dobę 138 kg uranu nieco wzbogaconego w izotop U 235, którego zawartość podniesiono do $\sim 1\%$. Dla uzyskania 138 kg wzbogaconego uranu trzeba zużyć 234,6 kg uranu naturalnego. Paliwo jądrowe zużyte, usuwane z reaktora, zawiera jeszcze 0,32% uranu U 235, ok. 0,53% plutonu i ok. 1,32 kg produktów rozpadu. W procesie tym około 1 g masy uranu U 235 i plutonu przekształciło się w energię.

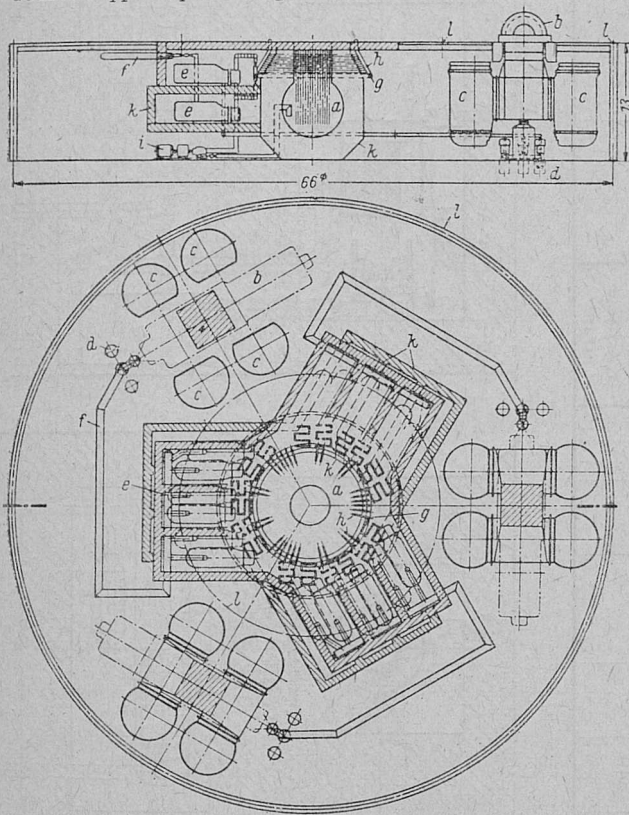
1 kg uranu naturalnego zastępuje 12,8 t paliwa umownego. Jeżeli przyjąć cenę uranu w rudzie na 8 dol./kg, a cenę metalicznie czystego uranu na 80 dol./kg, to koszt paliwa wyniesie $234,6 \cdot 80 \approx 19\,000$ dol. na dobę.

Dla porównania przyjęto elektrownię, opaloną węglem, o następującej charakterystyce: sprawność ogólna 30%, war-

miennik sodowo-wodny musi być specjalnej konstrukcji i szczególnie szczelny, gdyż sód reaguje z wodą w sposób wybuchowy.

Porównanie intensywności wytwarzania energii w reaktorze z wytwarzaniem w silnikach cieplnych i urządzeniach energetycznych daje następujące zestawienie:

	kcal/dm ³ ·h
nowoczesny kocioł na pył węglowy	250,
kocioł wysokiego ciśnienia typu okrętowego	2000,
komora spaliniowa silnika odrzutowego	3700,
rakieta V2	152000,
reaktor termiczny do produkcji plutonu	5,2,
reaktor typu wytwórczego	21000.



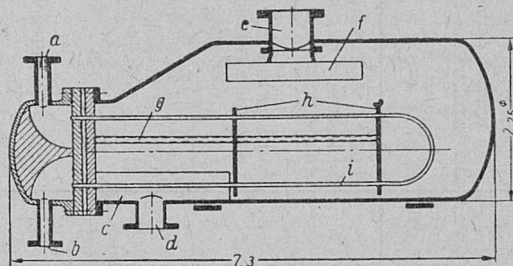
Rys. 12. Rysunek dyspozycyjny elektrowni atomowej o mocy 240 MW z niejednorodnym reaktorem, opartym na procesie przetworczym z powolnymi neutronami z zastosowaniem jako spowalnicza i czynnika chłodzącego ciężkiej wody D₂O

a - reaktor
b - turbina o mocy 80 MW
c - skraplacze
d - pompy skroplinowe
e - baterie 6 kotłów-wymienników
f - przewody parowe
g - kolektor pierścieniowy D₂O
h - przewody zbiorcze D₂O
i - pompy D₂O
k - osłona betonowa
l - belka podsuwnicowa

Widać z niego, jak intensywnym źródłem energii cieplnej jest reaktor typu wytwórczego, który ustępuje tylko rakiecie typu V2, należy jednak pamiętać, że w rakiecie proces spalania trwa najwyżej kilkadziesiąt sekund, reaktor zaś jest urządzeniem przeznaczonym do pracy ciągłej. Widzimy ogromną różnicę gęstości wytwarzanej energii pomiędzy reaktorem wykorzystującym pracę z neutronami powolnymi (termicznymi) a reaktorem wytwórczym, który jest oparty na działaniu elektronów szybkich, a w którym intensywność wytwarzania ciepła jest ograniczona tylko techniczną możliwością odprowadzenia ciepła przez czynnik chłodzący. Na rys. 11 podana jest wzajemna dyspozycja urządzeń elektrowni atomowej w skali laboratoryjnej z zastosowaniem opisanego wyżej reaktora wytwórczego.

Intensywność reakcji jądrowych zachodzących w reaktorze powoduje szybkie zanieczyszczenie rdzeni i płaszcza produktami rozszczepienia, które pochłaniając neutrony zmniejszają wydajność reakcji. Stąd konieczna jest częsta rafinacja i chemiczna przeróbka materiału jądra i płaszcza reaktora. Z płaszcza należy drogą chemiczną usunąć wytworzony w nim pluton, który z kolei wprowadza się do rdzenia dla uzupełnienia zużytego tam paliwa.

Na rys. 12 podano rozplanowanie elektrowni atomowej w skali przemysłowej o mocy 240 MW, możliwej do wykonania przy dzisiejszym stanie techniki. Turbiny ustawione są

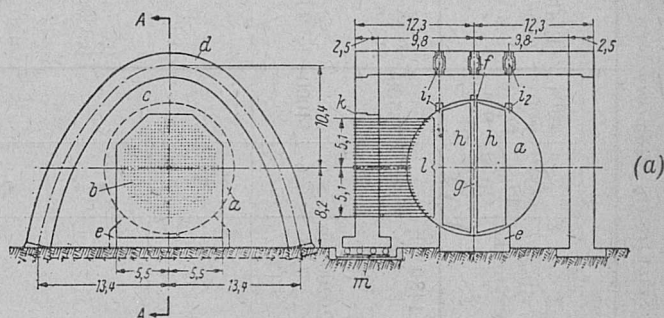


Rys. 13. Wymiennik ciepła — kocioł parowy ogrzewany krążącą w obiegu chłodzenia ciężką wodą

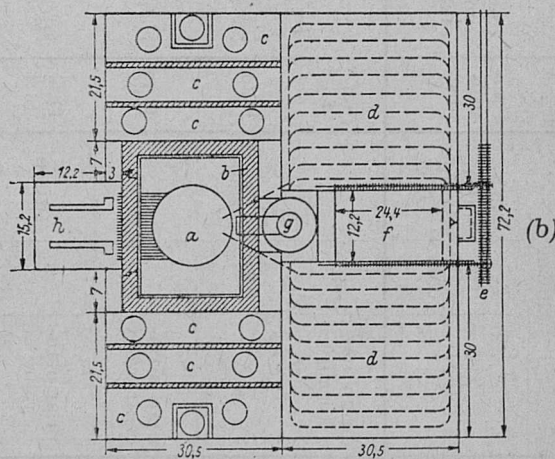
a — dopływ D₂O
b — odpływ D₂O
c — wstępne podgrzewanie wody zasilającej
d — dopływ wody zasilającej
e — odpływ pary
f — wodooddzielacz
g — rozporę i 656 rurek „U” stanowiących powierzchnię czynną wymiennika

w wierzchołkach trójkąta równobocznego, sam reaktor znajduje się w środku trójkąta.

Rdzeń samego reaktora jest kształtu cylindrycznego i znajduje się w kuli stalowej o średnicy ok. 6,3 m ze stali austen-



a — kulisty kocioł stalowy o średnicy 13,4 m
b — ruchoma ściana osłony betonowej
c — stała ściana osłony betonowej
d — osłona
e — fundament betonowy reaktora
f — 18 kanałów doprowadzających gaz chłodzący od kotłów do reaktora
g — szczelina pomiędzy połówkami reaktora
h — cylindry grafitowe — połówki reaktora
i₁, i₂ — po 18 kanałów odprowadzających gorący gaz z reaktora do kotłów

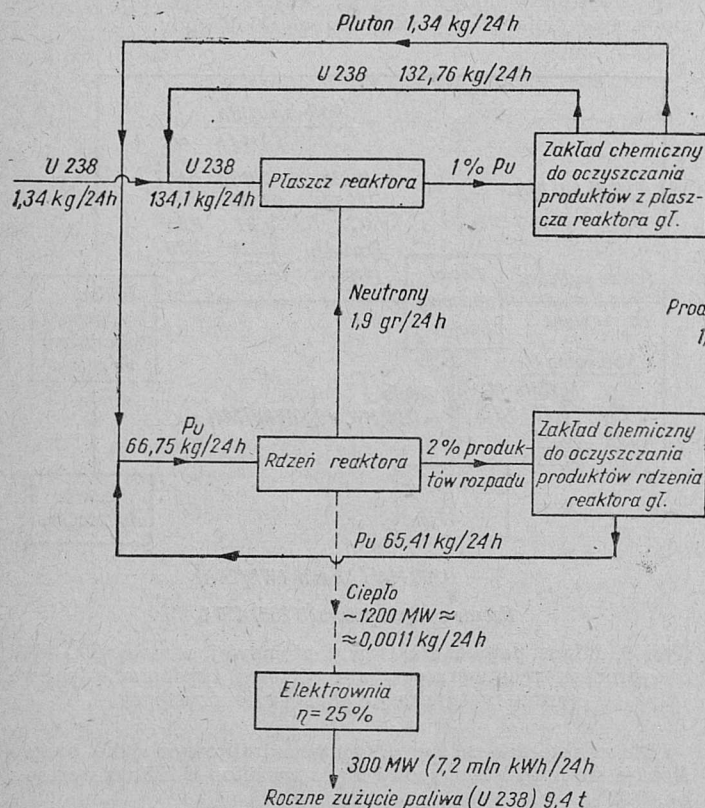


a — reaktor
b — osłona biologiczna
c — kotły i wentylatory obiegu gazu chłodzącego
d — magazyn materiałów promieniotwórczych i paliwa dla regeneracji
e — rampa
f — turbinownia
g — komin
h — pomieszczenie do ładowania reaktora

Rys. 14. Plan elektrowni atomowej o mocy ok. 50 MW z niejednorodnym reaktorem grafitowym, z helem jako czynnikiem chłodzącym (z prawej strony przekrój A-A)

tość opałowa węgla 6000 kcal/kg, cena węgla 5 dol./t, (pochodzącego z kopalni odkrywkowej, położonej bezpośrednio przy elektrowni), dobowe zużycie paliwa 3450 t; koszt paliwa wyniesie tu 17200 dol./24 h. Jak widać, nawet przy obecnej wysokiej cenie uranu a bardzo niskiej założonej cenie węgla koszt paliwa jest faktycznie ten sam. Porównanie wypadnie jednak na korzyść paliwa atomowego, gdy elektrownia będzie oddalona od kopalni, gdyż wtedy trzeba przewieźć uranu 1/4 t, a węgla 3500 t.

Paliwo „przepalane” usuwane z reaktora zawiera jeszcze znaczną ilość materiału rozszczepialnego, a przede wszyst-



Rys. 10. Bilans paliwa dla prawdopodobnego procesu wytwórczego z całkowitą regeneracją (paliwo dodatkowe — uran naturalny chemicznie czysty) wytwórczego

kim ok. 735 g/24 h plutonu, który — jako chemicznie różniący się od uranu — może być łatwiej wydzielony metodami chemicznymi i może być z powrotem wprowadzony do reaktora, zmniejszając w ten sposób zużycie naturalnego uranu z 234,6 kg do 64 kg na dobę. Konieczny jest nowy element produkcji — zakład chemiczny do oczyszczania paliwa; rentowność takiego zakładu poprawia się wskutek możliwości uzyskania cennych izotopów promieniotwórczych znajdujących się w produktach rozszczepienia. Na rys. 9 podany jest prawdopodobny bilans paliwa — z częściową regeneracją — reaktora typu przetwórczego.

1 kg uranu naturalnego zastępuje tu 47 t paliwa umownego. Koszt paliwa dla elektrowni o mocy 300 MW z zastosowaniem tego obiegu wynosi ok. 5100 dol. na dobę, co daje już znaczną oszczędność w koszcie paliwa w stosunku do elektrowni węglowej. W kosztach ruchowych elektrowni przy zastosowaniu powyższego obiegu należy jednak uwzględnić koszty ruchowe zakładu chemicznego do oddzielania plutonu oraz wartość produktów ubocznych.

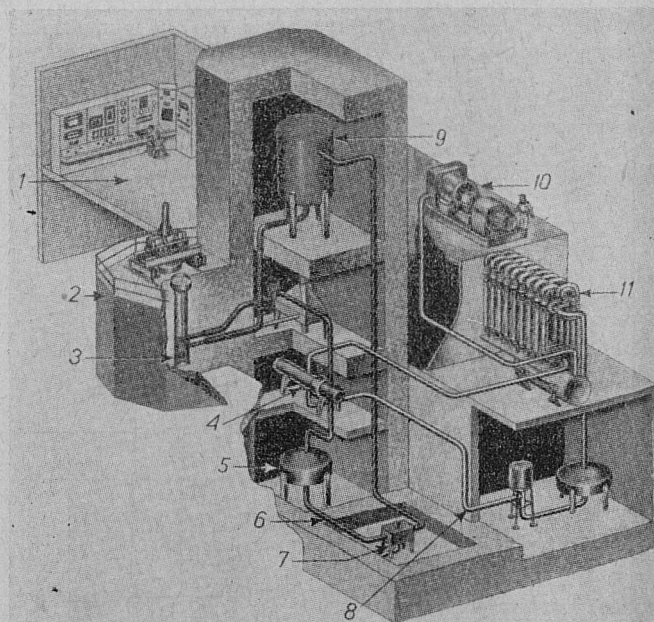
Najlepsze wyzyskanie paliwa jądrowego osiąga się przy zastosowaniu reaktora pracującego w obiegu w y t w ó r c z y m, tzn. z pełnym zużyciem uranu przez przetwarzanie uranu U 238 w pluton. Pracują tu neutrony szybkie, nie zwolnione żadnym spowalniczem. Prędkość neutronów wynosi, jak w chwili wyzwolenia się z rozpadającego się jądra uranu ok. 13 500 km/s. Reaktor tego typu, jak już była mowa wyżej, składa się z rdzenia, w którym odbywa się bardzo energiczny rozpad („spalanie”) paliwa jądrowego oraz płaszczu osłaniającego ów rdzeń. Płaszcz pochłania intensywnie wydzielającą się z rdzenia neutrony i następuje w nim proces przetwarzania się uranu w pluton.

Zapotrzebowanie uranu naturalnego uzupełniającego reaktor może wynosić przy zastosowaniu powyższego obiegu dla rozpatrywanej elektrowni o mocy 300 MW tylko 1,34 kg na dobę lub 9,4 tony rocznie. 1 kg uranu naturalnego zastępuje w reaktorze wytwórczym 2230 t paliwa umownego.

Cały układ, jak widać z rys. 10, jest znacznie bardziej skomplikowany niż układy poprzednio omawiane, wymaga bowiem zastosowania dwóch zakładów chemicznych: jednego do separacji produktów z płaszczu reaktora wydzielania plutonu, do zasilenia rdzenia reaktora, do odseparowania uranu ciężkiego (U 238) i skierowania go z powrotem do płaszczu, oraz drugiego zakładu separacyjnego do oczyszczania plutonu z produktów rozpadu, które w ilości ok. 1,33 kg na dobę stanowią produkt odpadkowy zakładu. Obieg ten jest wypróbowany w skali laboratoryjnej dla opisanej wyżej elektrowni o mocy ok. 250 kW. Jednym z zasadniczych problemów dla realizacji tego procesu w skali przemysłowej jest opanowanie technologii chemicznej zakładów do separacji z rdzenia i płaszczu reaktora tego typu.

5. Elektrownie atomowe.

Rdzeń wymienionego wyżej reaktora wytwórczego jest wykonany całkowicie z rozszczepialnego paliwa jądrowego i jest mniej więcej wielkości piłki nożnej. W rdzeniu odbywa się intensywnie proces rozszczepiania, wydzielając się bardzo wiele ciepła, odprowadzanego przy pomocy płynnego sodu. Rdzeń reaktora jest otoczony płaszczem wykonanym z uranu naturalnego^{*)}. Silny strumień neutronów o nie spotykanej w innych reaktorach gęstości (do 10^{14} neutronów na $1\text{ cm}^2\cdot\text{s}$), powstały w łańcuchowym procesie rozszczepienia wychodzi z rdzenia i przenika do płaszczu, w którym powstaje proces transmutacji U 238 w Pu 239. Czynnikiem chłodzącym, który przepływa przez płaszcz i omywa rdzeń reaktora, nagrzewa się i staje się silnie promieniotwórczy. Aby oddzielić od czynnika radioaktywnego elementy wymagające obsługi, stosuje się wtórny obieg chłodzący również



Rys. 11. Elektrownia atomowa w skali laboratoryjnej z reaktorem opartym na procesie wytwórczym z szybkimi neutronami

- | | |
|---|---|
| 1 — nastawnia | 7 — pompa elektromagnetyczna |
| 2 — osłona biologiczna | 8 — wtórny obieg chłodzący promieniotwórczo obojętny |
| 3 — rdzeń reaktora | 9 — zbiornik zasilający |
| 4 — wymiennik ciepła I stopnia | 10 — turbogenerator o mocy 250 kW |
| 5 — zbiornik wyrównawczy | 11 — wymiennik II stopnia, sodowo-wodny kocioł parowy |
| 6 — obieg pierwotny silnie promieniotwórczy | |

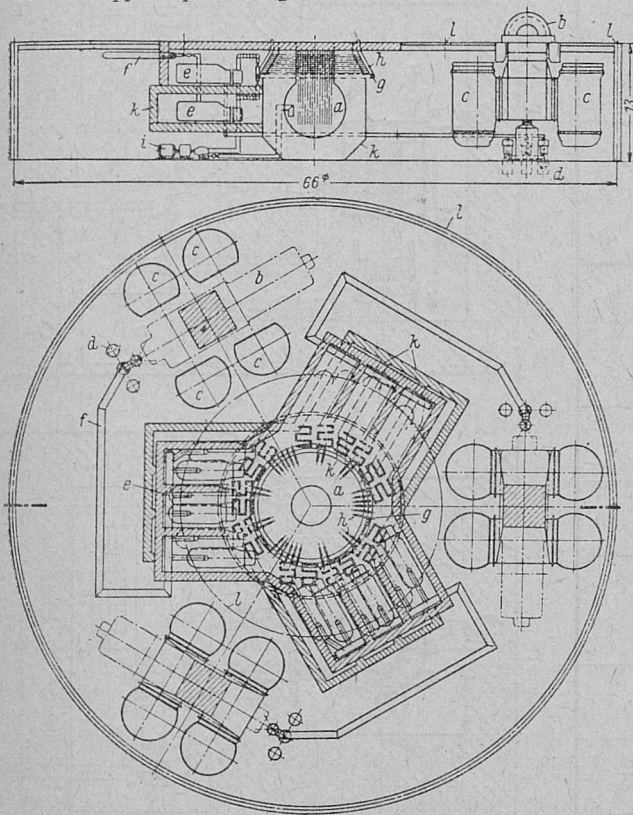
sodowo-potasowy, pobierający ciepło z obiegu pierwotnego za pomocą powierzchniowych wymienników ciepłych. Ten wtórny obieg płynnego metalu ogrzewa dopiero wodę w drugim wymienniku powierzchniowym. Wy-

^{*)}Por. W o ł c z e k O. Stosy jądrowe do wytwarzania energii elektrycznej (str. 295 niniejszego zeszytu).

miennik sodowo-wodny musi być specjalnej konstrukcji i szczególnie szczelny, gdyż sód reaguje z wodą w sposób wybuchowy.

Porównanie intensywności wytwarzania energii w reaktorze z wytwarzaniem w silnikach cieplnych i urządzeniach energetycznych daje następujące zestawienie:

	kcal/dm ³ ·h
nowoczesny kocioł na pył węglowy	250,
kocioł wysokiego ciśnienia typu okrętowego	2000,
komora spaliniowa silnika odrzutowego	3700,
rakiet V2	152000,
reaktor termiczny do produkcji plutonu	5,2,
reaktor typu wytwórczego	21000.



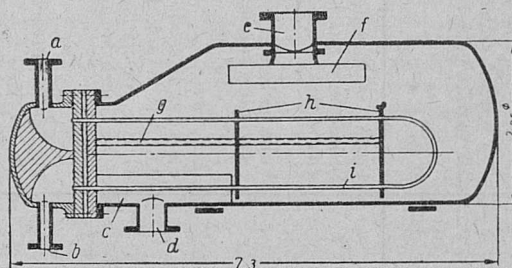
Rys. 12. Rysunek dyspozycyjny elektrowni atomowej o mocy 240 MW z niejednorodnym reaktorem, opartym na procesie przemianowym z powolnymi neutronami z zastosowaniem jako spowalnicza i czynnika chłodzącego ciężkiej wody D₂O

- | | |
|----------------------------------|---|
| a — reaktor | g — kolektor pierścieniowy D ₂ O |
| b — turbina o mocy 80 MW | h — przewody zbiorcze D ₂ O |
| c — skraplacz | i — pompy D ₂ O |
| d — pompy skroplinowe | k — osłona betonowa |
| e — baterie 6 kotłów-wymienników | l — belka podsuwnicowa |
| f — przewody parowe | |

Widać z niego, jak intensywnym źródłem energii cieplnej jest reaktor typu wytwórczego, który ustępuje tylko rakiecie typu V2, należy jednak pamiętać, że w rakiecie proces spalania trwa najwyżej kilkadziesiąt sekund, reaktor zaś jest urządzeniem przeznaczonym do pracy ciągłej. Widzimy ogromną różnicę gęstości wytwarzanej energii pomiędzy reaktorem wykorzystującym pracę z neutronami powolnymi (termicznymi) a reaktorem wytwórczym, który jest oparty na działaniu elektronów szybkich, a w którym intensywność wytwarzania ciepła jest ograniczona tylko techniczną możliwością odprowadzenia ciepła przez czynnik chłodzący. Na rys. 11 podana jest wzajemna dyspozycja urządzeń elektrowni atomowej w skali laboratoryjnej z zastosowaniem opisanego wyżej reaktora wytwórczego.

Intensywność reakcji jądrowych zachodzących w reaktorze powoduje szybkie zanieczyszczenie rdzeni i płaszczu produktami rozszczepienia, które pochłaniając neutrony zmniejszają wydajność reakcji. Stąd konieczna jest częsta rafinacja i chemiczna przeróbka materiału jądra i płaszczu reaktora. Z płaszczu należy drogą chemiczną usunąć wytworzony w nim pluton, który z kolei wprowadza się do rdzenia dla uzupełnienia zużytego tam paliwa.

Na rys. 12 podano rozplanowanie elektrowni atomowej w skali przemysłowej o mocy 240 MW, możliwej do wykonania przy dzisiejszym stanie techniki. Turbiny ustawione są

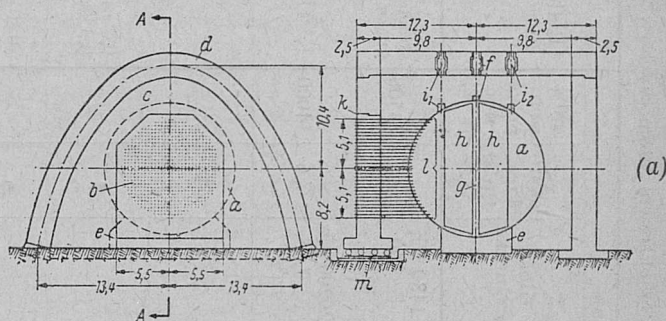


Rys. 13. Wymiennik ciepła — kocioł parowy ogrzewany krążącą w obiegu chłodzenia ciężką wodą

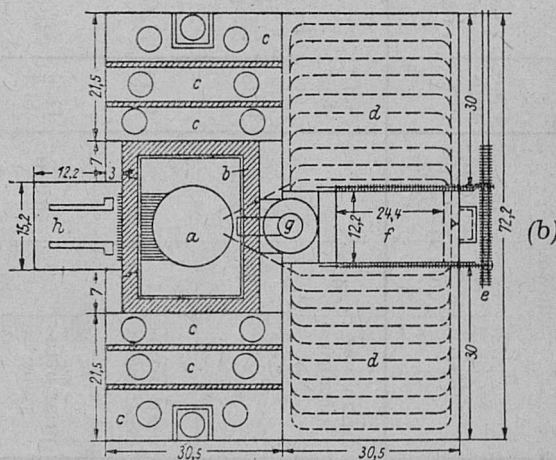
- | | |
|---|---|
| a — dopływ D ₂ O | e — odpływ pary |
| b — odpływ D ₂ O | f — wodooddzielacz |
| c — wstępne podgrzewanie wody zasilającej | h, g — rozporzy i 656 rurek „U” stanowiących powierzchnię czynną wymiennika |
| d — dopływ wody zasilającej | |

w wierzchołkach trójkąta równobocznego, sam reaktor znajduje się w środku trójkąta.

Rdzeń samego reaktora jest kształtu cylindrycznego i znajduje się w kuli stalowej o średnicy ok. 6,3 m ze stali austenicznej.



- | | |
|--|--|
| a — kulisty kocioł stalowy o średnicy 13,4 m | f — 18 kanałów doprowadzających gaz chłodzący od kotłów do reaktora |
| b — ruchoma ściana osłony betonowej | g — szczelina pomiędzy połówkami reaktora |
| c — stała ściana osłony betonowej | h — cylindry grafitowe — połówki reaktora |
| d — osłona | k — przewody elastyczne |
| e — fundament betonowy reaktora | i ₁ , i ₂ — po 18 kanałów odprowadzających gorący gaz z reaktora do kotłów |

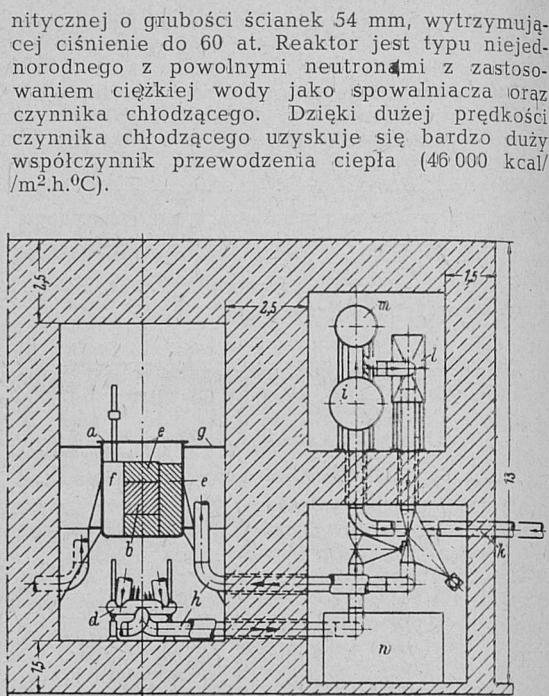


- | | |
|--|---|
| a — reaktor | e — rampa |
| b — osłona biologiczna | f — turbinownia |
| c — kotły i wentylatory obiegu gazu chłodzącego | g — komin |
| d — magazyn materiałów promieniotwórczych i paliwa dla regeneracji | h — pomieszczenie do ładowania reaktora |

Rys. 14. Plan elektrowni atomowej o mocy ok. 50 MW z niejednorodnym reaktorem grafitowym, z helem jako czynnikiem chłodzącym (z prawej strony przekrój A-A)

Tabela III. Zestawienie charakterystycznych danych kilku projektów elektrowni atomowych w skali przemysłowej (charakterystyka reaktora)

Typ reaktora	Szybkość neutronów	Paliwo		Spowalniacz	Chłodzenie					Reflektor (waga lub grub.)	Wymiary rdzenia reaktora			Kocioł stalowy dla zamknięcia reaktora
		rodzaj	maks. temp. (°C)		ilość oraz nasycenie U235	czynniki	temperat. (°C)	ciśnienie (ata)	ilość czynnika		szybkość (m/s)	moc pompowania (kW)	osłona biologiczna	
Niejednorodny przetwórczy	termiczna	uran naturalny	540°		He	230	395	1480 t/h = 400 m³/s		23500	niskowart. grafit 498 t.	10,5	6	kocioł w kształcie kuli o średnicy ok. 13 m na ciśnienie robocze 10 atm
"	"	"	240°	211 ton (sztaby)	D ₂ O 227 t	198	227	29200 t/h = 7,45 m³/s	7,6	14000	D ₂ O			kula o średnicy 6 m na ciśnienie robocze ok. 56 ata
"	"	uran skoncentrowany			H ₂ O	190	230							cylinder o średnicy ok. 3,6 m wysokości ok. 11,5 m na ciśnienie robocze 56 ata
"	"	uran naturalny		60 ton	D ₂ O 18 t	196	260		5		0,3 m H ₂ O 0,3 m D ₂ O	4	3,6	kocioł niepotrzebny
Niejednorodny wytwórczy	wielka	wysoko skoncentrowany U235			nie ma	315	485		9		naturalny uran	1	1	"
Jednorodny wytwórczy	"	wysoko skoncentrowany U235 lub Pn w roztworze			nie ma	205	540				naturalny niskowartościowy uran	1	1	"



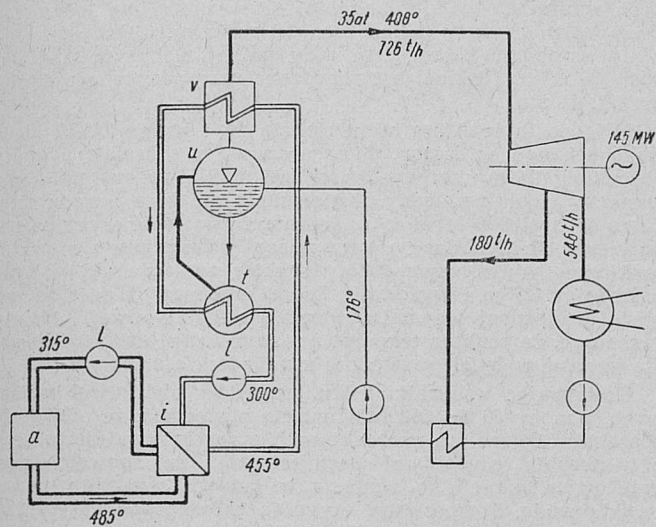
Rys. 15. Reaktor oparty na procesie wytwórczym z szybkimi neutronami dla elektrowni o mocy 145 MW

- a — reaktor
 b — rdzeń
 c — zwierciadło
 d — kolektor pierścieniowy
 e — piasek reaktora
 f — cylinder regulacyjny
 g — uszczelnienia helowe
 h — przewody pierwotnego obiegu chłodzącego
 i — wymiennik ciepła sodowo-sodowy
 k — przewody sodowe drugiego (wtórnego) obiegu chłodzącego
 l — pompy elektromagnetyczne
 m — ekspansyjny zbiornik helowy
 n — fundament turbiny
 o — pomieszczenie pomp wody zasilającej
 p — miejsce obsługi
 q — urządzenie pomocnicze
 r — skład materiałów radioaktywnych
 s — magazyn
 t — dolny waleczak kotła wodnego
 u — górny waleczak kotła
 v — przegrzewacz parowy ogrzewany sodem z obiegu wtórnego
 w — zbiornik odpadów

Całość obiegu musi być utrzymana pod tak wysokim ciśnieniem, żeby uniknąć wrzenia ciężkiej wody. W urządzeniu do chłodzenia pracuje 9 pomp obiegowych o mocy 1500 kW każda, w tym trzy z napędami parowymi. Pompy tłoczą ciężką wodę dziewięciu przewodami o średnicy 450 mm do kotła reaktora. Ciężka woda po na-

grzaniu się w reaktorze odprowadzana jest do 18 wyparek wodno-parowych. Rurociągi z wodą ciężką są izolowane 100-milimetrową warstwą ołowiu dla ochrony przed promieniowaniem. Dla ochrony przed zanieczyszczeniem oraz utlenianiem wszystkie swobodne powierzchnie ciężkiej wody w stosie znajdują się pod uszczelniającą poduszką z helu.

Cały reaktor oraz kotły-wyparki znajdują się w osłonie betonowej o grubości 2,5 m. Zmiana mocy reaktora odbywa



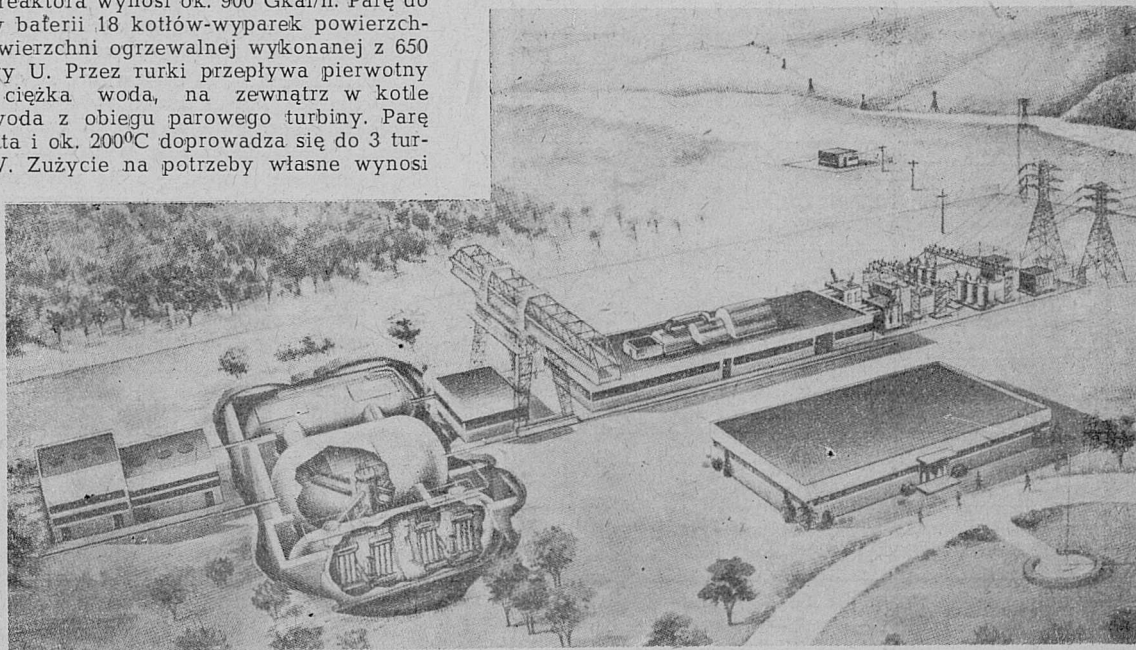
Rys. 16. Schemat cieplny siłowni o mocy 145 MW z reaktorem wytwórczym

a — reaktor wytwórczy
i — wymiennik ciepła
l — pompy elektromagnetyczne dla sodu
t — dolny walczak
u — górny walczak
v — osadnik

się przy pomocy sztab regulacyjnych ze stali zawierającej 1,5% boru.

Wydaźność cieplna reaktora wynosi ok. 900 Gkal/h. Parę do turbin otrzymuje się w baterii 18 kotłów-wyparek powierzchniowych (rys. 13) o powierzchni ogrzewalnej wykonanej z 650 rurek w kształcie litery U. Przez rurki przepływa pierwotny czynnik chłodzący — ciężka woda, na zewnątrz w kotle znajduje się zwykła woda z obiegu parowego turbiny. Parę o parametrach ok. 13 ata i ok. 200°C doprowadza się do 3 turbozespołów po 80 MW. Zużycie na potrzeby własne wynosi

Rys. 17. Szkic architektoniczny elektrowni o mocy 60 MW



20,5 MW, tj. ok. 8,5%; są to głównie napędy pomp zasilających kotły oraz pompy przeładowe dla ciężkiej wody w pierwotnym obiegu chłodzącym reaktora. Jak widzimy, w części parowej elektrownia ma bardzo niskie parametry i parę nasyconą, niesosowane już od lat 40.

Koszt elektrowni szacowany jest na 118 mln dol., czyli ok. 370 dol./kW, a więc wynosi o 180% więcej niż koszt zwykłej elektrowni parowej tej samej mocy. Znaczne obciążenie stanowi tu koszt ciężkiej wody, który wynosi ok. 180 dol./kg. W obiegu reaktora musi znajdować się 220 t ciężkiej wody, której koszt wynosi ok. 35% kosztów inwestycyjnych całej elektrowni.

Na rys. 14a i 14b pokazany jest szkic elektrowni atomowej z zastosowaniem niejednorodnego reaktora pracującego

w procesie przetwórczym z wolnymi neutronami, grafitowym spowalniczem i chłodzeniem za pomocą helu. Moc elektrowni wynosi ok. 50 MW. Charakterystyka jest podana w poz. 1 zestawienia (tabl. III i IV).

Jako czynnik chłodzący wybrany jest hel, ponieważ jako gaz szlachetny nie reaguje on z uranem, zupełnie nie pochłania neutronów oraz ma znaczną pojemność cieplną. W celu zwiększenia skutku chłodzenia hel znajduje się pod ciśnieniem 9,5 atn. Z tego powodu cały reaktor jest umieszczony w kuli ze stali niskostopowej o średnicy 13,4 m i grubości ścianek 42 mm. Przez stos i wymienniki ciepła przetłacza się hel za pomocą sześciu dmuchaw o mocy 2500 kW każda. Hel ogrzewa 12 kotłów parowych z wymuszonym obiegiem. Chociaż hel nie pochłania zupełnie neutronów, jednak może unieść z reaktora cząsteczki radioaktywne i z tego względu kotły i dmuchawy otoczone są murem betonowym o grubości 0,6 m.

Na rys. 15 podany jest szkic reaktora pracującego na procesie wytwórczym z szybkimi neutronami i wytwarzającego ciepło dla elektrowni o mocy ok. 145 MW (charakterystyka według poz. 5 tablicy porównawczej).

Na rys. 16 podany jest uproszczony schemat cieplny tej elektrowni. Układ jest zasadniczo taki sam jak opisanej wyżej elektrowni w skali laboratoryjnej (rys. 11).

Reaktor jest typu wytwórczego (reprodukującego). Temperatury robocze w reaktorze są znacznie wyższe niż w reaktorze z neutronami termicznymi.

Jest tu nieco większa swoboda przy wyborze materiałów konstrukcyjnych, gdyż szybkie neutrony nie są tak silnie absorbowane jak neutrony powolne. Rdzeń reaktora stanowi cylinder o średnicy i wysokości około 1 m, obłożony płaszczem. Całość znajduje się w cylindrze stalowym o średnicy i wysokości ok. 2,5 m. Sztaby paliwa jądrowego znajdują się w gilzach ze stali stopowej. 90% ciepła wywiązujące się w rdzeniu, a ok. 10% w płaszczu. Ciepło jest odprowadzane przez dwa w szereg połączone obiegi sodowe. Obieg pierwotny podgrzewa obieg wtórny (pośredni), który z kolei ogrzewa trzeci obieg wody, gdzie wytwarza się parę o ciśnieniu 34 atn.

W obu obiegach sodowych sód jest pompowany przy pomocy pomp elektromagnetycznych. Kocioł sodowo-parowy ma naturalną cyrkulację, dwa walczaki oraz przegrzewacz.

Regulacja reaktorów odbywa się przez wsuwanie pomiędzy rdzeń i płaszcz reaktora płyty odbijającej strumień neutronów lub przez zmianę wzajemnego położenia płaszcza i rdzenia.

Paliwo jądrowe rdzenia i płaszcza musi być co rok wymieniane. Cały proces wymiany paliwa musi być zdalnie sterowany i trwa około 1 miesiąca.

Na rys. 17 przedstawiono szkic perspektywiczny elektrowni o mocy 60 MW (jeden zespół), a na rys. 18a — schematycznie układ odprowadzenia ciepła z reaktora oraz na rys. 18b —

Tablica IV. Charakterystyka elektrowni

Do- pro- wa- dzone ciepło (MW)	Moc elektryczna		Spraw- ność ogólna %	Parametry pary		Kotły parowe			Zużycie pary (kg/kWh)	Turbo- zespoły	Nakłady inwestycyjne			Roczne koszty (mln dol.)			Koszty *) × 10 ³ (dol/ kWh)	Rysunek w tekście
	brutto (MW)	netto (MW)		(atm)	(°C)	liczba	wydajn. jednego (t/h)	łączna wydajn. (t/h)			całość instal. (mln dol)	w tym sam reak- tor (mln dol.)	koszt jednost- kowy (dol./kW)	łączne koszty	w tym chem. przy- gotow. paliwa	w tym koszty ruchu		
350	61,7	46,7	13,5	17,5	274	10	41	410	6,7	1 × 60 MW	40	8	640				rys. 14	
1064	223	212	20	11,3	190	18	82	1480	6,6	3 × 80 MW	118	48	530				rys. 12 i 13	
	246													297				
500	106	101	20,1	11,2	192	4				1 × 125 MW	41	21	385					
500	154,5	145,3	29,0	34	400	2	363	726	4,7	1 × 155 MW (2 - kadtu- bowy)	51	30	330	12,5	4,5	1,2	rys. 15 i 16	
220	66		30								60		480	5,6	0	0,5	6	

*) Koszt energii z elektrowni węglowej dużej mocy wynosi ok. 6.10⁻³ dol./kWh.

odpowiedni szkic dyspozycyjny reaktora i związanych z nim wodo-wodnych wymienników ciepła — wyparek.

Zastosowano tu reaktor pracujący w obiegu przetwórczym ze zwykłą wodą jako spowalniczem i czynnikiem chłodzącym. Ponieważ średnia temperatura chłodzonych części reaktora wynosi ok. 280°C, a najwyższa ok. 345°C, woda chłodząca znajduje się pod ciśnieniem 140 at, aby uniknąć parowania i kawitacji. Wydajność każdego z czterech zespołów chłodzących wynosi 60 m³/h. Dla pełnej mocy potrzebna jest praca 3 zespołów, czwarty zespół stanowi rezerwę. Całkowita ilość wody w obiegu chłodzącym przy pełnej mocy 60 MW wynosi 180 m³/h. Turbina jest napędzana parą nasyconą o ciśnieniu ok. 41 at.

W rdzeniu reaktora znajduje się 10 t uranu U235 nieco wzbogaconego w izotop. Blok uranowy ma kształt cylindra o średnicy 1,8 m oraz wysokości 2,25 m. Największe natężenie wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią reaktora a wodą chłodzącą wynosi 950 Mcal/m²·h, średnia zaś gęstość wytwarzanego ciepła 39 Mcal/dm³, a więc więcej niż w opisanym wyżej reaktorze wytwórczym. Cały reaktor znajduje się w kotle o średnicy 2,7 m i wysokości 7,5 m, wykonanym ze stali węglistej wyłożonej wewnątrz warstwą stali stopowej. Należy zaznaczyć, że reaktor tego typu zastosowany jest jako kocioł dla siłowni w łodzi podwodnej z napędem atomowym.

Zestawiając wskaźniki kilku projektów elektrowni atomowych o mocy 50 do 250 MW można stwierdzić, że większość projektów opiera się na reaktorach z zastosowaniem procesu z neutronami powolnymi (termicznymi), ze spowalniczem grafitowym lub ciężką wodą, a w jednym wypadku nawet zwykłą wodą. Temperatura czynnika chłodzącego na wyjściu z reaktora nie przekracza 250°C. W dużych projektach opartych na reaktorach wytwórczych z szybkimi neutronami przewiduje się podniesienie temperatury na wyjściu do 480°C, a nawet 540°C, co pozwala zastosować wysokie parametry pary w obiegu wtórnym.

Jako paliwo stosowany jest przeważnie uran naturalny, ewentualnie lekko wzbogacony w izotop U235 do zawartości 0,9%. Do reaktorów wytwórczych musi być stosowany uran silnie wzbogacony w izotop U235 lub pluton. Nakłady inwestycyjne są szacowane w granicach 150 do 250% kosztów odpowiedniej elektrowni parowej.

W tablicach I i II zestawione są charakterystyki kilku rozpatrywanych projektów siłowni atomowych. Wszystkie te projekty opierają się na zastosowaniu reaktorów, które oprócz ciepła mogą jednocześnie wytwarzać pluton.

Najnowsze projekty, o ile wiadomo, opierają się głównie na zastosowaniu reaktora wytwórczego z szybkimi neutronami, który daje tańsze rozwiązanie zarówno pod względem nakładów inwestycyjnych, jak i kosztów ruchu. Brak spowalnicza pozwala podnieść temperaturę w reaktorze do 600°C i wyżej; czynnikiem chłodzącym jest płynny metal. Duże widoki ma zastosowanie reaktora typu jednorodnego z płynnymi stopami soli uranu i plutonu. Taki typ reaktor uproszcza znacznie procesy chemiczne obróbki paliwa przed wyzyskaniem i po wyzyskaniu go w reaktorze. Bardzo interesującym i rokującym duże nadzieje na praktyczne zastosowanie jest reaktor chłodzony zwykłą wodą, która wrze i paruje w samym reaktorze. Parę z reaktora doprowadza się bezpośrednio do turbiny. Dzięki temu cały układ ulega znacznemu uproszczeniu; oczywiście, turbiny i rurociągi pomiędzy reaktorem a turbiną muszą być okryte osłoną biologiczną. Układ ma pewne zdolności samoregulacji, gdyż zbyt gwałtowne parowanie powoduje przytłumienie przebiegu reakcji łańcuchowej (rys. 19).

6. Gospodarcze perspektywy energii atomowej na tle oceny wyzyskania światowych zasobów energetycznych.

Zasadniczym surowcem energetycznym do produkcji energii elektrycznej są paliwa stałe. Udział energii wód w światowej produkcji energii elektrycznej utrzymuje się od kilkadziesiąt lat na poziomie ok. 25—30%, reszta, to jest z górą 70% wyprodukowane było prawie wyłącznie kosztem spalania węgla. Wzrost produkcji węgla jest znacznie wolniejszy aniżeli wzrost produkcji energii elektrycznej; stąd rola energetyki jako konsumenta paliwa stałego stale wzrasta pomimo postępu technicznego i bardzo intensywnej poprawy sprawności ogólnej przetwarzania ciepła w energię elektryczną. Należy oczekiwać dalszego, równie intensywnego wzrostu światowego zapotrzebowania energii. Wiele narodów Azji i Europy — na skutek zmiany ustroju społecznego — weszło na drogę szybkiego rozwoju gospodarczego. Można przyjąć, że stały

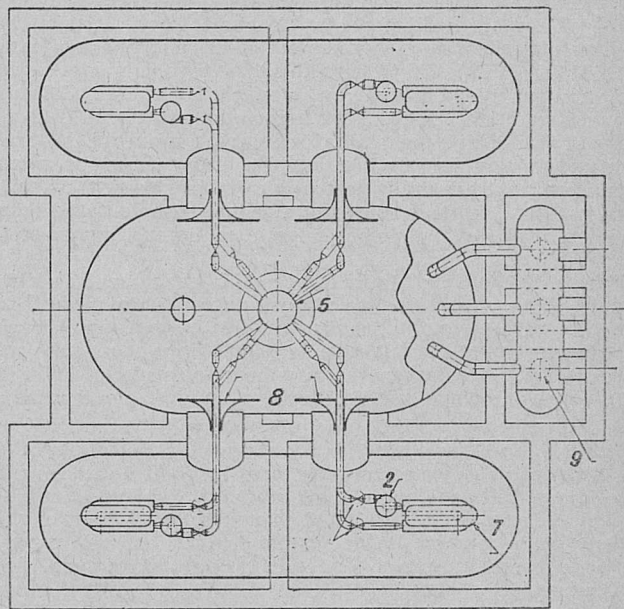
dalszy wzrost światowego zapotrzebowania energii będzie wynosić 6 — 12% rocznie, produkcja węgla natomiast może być zwiększana w znacznie powolniejszym stopniu ze względu na szczególne warunki pracy związane z wydobyciem węgla.

Tabl. V podaje rzeczywiste i prawdopodobne kształtowanie się wydobycia węgla i produkcji energii w latach 1925—1950—1975.

Zasoby węgla kamiennego do głębokości 2000 m według szacunku z 1936 r. wynosiły ok. 4500 mlrd ton, z tego zasoby tzw. pewne oceniane były na 900 mlrd ton. Przy założeniu rocznego przyrostu światowego wydobycia węgla o 2%, co — jak widzimy z podanych cyfr rozwoju produkcji węgla — należy uważać za cyfrę wysoką, obecne znane zasoby światowe wystarczą na 200 lat z górą.

Z podanych wyżej szacunkowych zasobów węgla ok. 85% znajduje się w Europie, azjatyckiej części ZSRR oraz w Sta-

Trudności z węglem i obawa deficytu węgla — w związku z szybkim wzrostem zapotrzebowania energii elektrycznej — dają się odczuć niemal na całym świecie i zmuszają do szukania nowych źródeł energii. Forsowane jest bardzo, szczególnie w Związku Radzieckim, budownictwo wodne.



Układ chłodzący

Rys. 18a i 18b. Schemat układu wymienników ciepła

1 — kocioł 2 — pompa 3 — woda zasilająca do kotła 4 — para do turbiny 5 — reaktor 6 — urządzenie pomocnicze 7 — wytwornica pary 8 — osłony 9 — odsalanie wody

nach Zjednoczonych, tj. na obszarze stanowiącym ok. 1/4 powierzchni lądów. Nie ma powodu przypuszczać, aby pozostałe 3/4 powierzchni lądów były bardziej ubogie w zasoby węgla

Światowe zasoby energetyczne w przeliczeniu na ciepło są następujące:

ropa naftowa	19.10 ¹¹ Gkal
ropa z łupków bitumicznych	22.10 ¹¹ „
gaz ziemny	3.10 ¹¹ „
węgiel (kamienny i brunatny)	395.10 ¹¹ „
razem paliwo naturalne	469.10 ¹¹ Gkal

Paliwa jądrowe:

uran	9300.10 ¹¹ Gkal
tor	400.10 ¹¹ „

Powyższe dane pochodzą ze źródeł amerykańskich na 1.I.1950 r. Wartość energetyczna atomowych surowców energetycznych obliczona jest przy założeniu całkowitego rozszczepienia, które można uzyskać w reaktorze wytwórczym według równoważnika 1 kg paliwa jądrowego = 2500 t węgla. Według oceny geochemików Goldszmita i Wiernadskiego średnia zawartość uranu w skorupie ziemskiej wynosi ok. 4 g na tonę, a więc w jednokilometrowej warstwie skorupy ziemskiej powinno znajdować się ok. 10.10¹² ton uranu. Tor jest pierwiastkiem 3-krotnie więcej rozpowszechnionym niż uran. Wiadomo, że cały ołów na ziemi jest pochodzenia promieniotwórczego, jako ostatni produkt rozpadu promieniotwórczego toru. Produkcja światowa ołowiu wynosiła ok. 1,3 mln ton, ołów zaś jest 6 razy więcej rozpowszechniony niż uran, a 3 razy więcej niż tor.

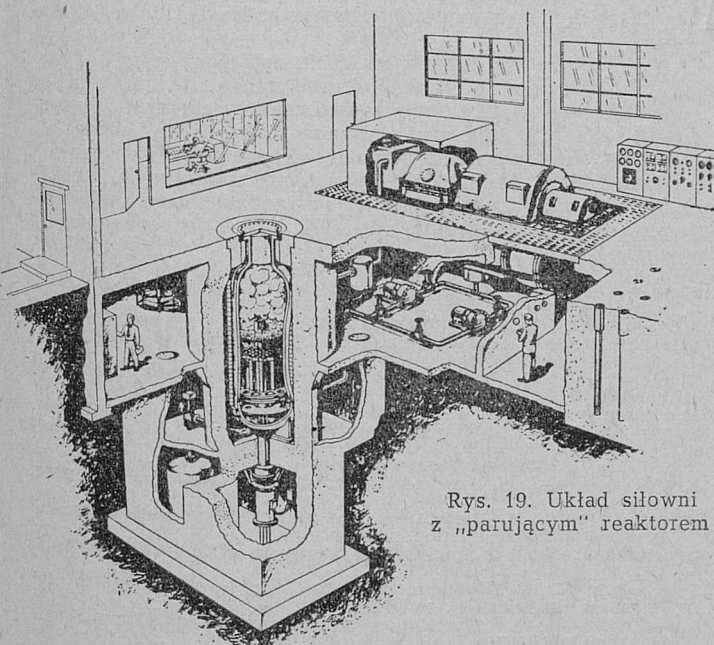
Tablica V

	1925	1950	1975
Światowa produkcja węgla (mln t)	1136	1540	2100
Światowa produkcja energii elektr. (10 ⁹ kWh)	143	720	3000
w tym elektr. wodnych (10 ⁹ kWh)	60	240	700
„ elektr. ciepłych (10 ⁹ kWh)	83	480	2300
Spoż. paliwa na cele produkcji energii elektr. (mln t)	84	295	900
To samo, lecz w stosunku do całkowitej produkcji węgla (%)	7,3	19	43

niż lepiej zbadana część powierzchni lądów, przeciwnie, są oznaki, że są one również bogate w zasoby energetyczne.

Trudności energetyczne wskutek zwiększającego się zapotrzebowania węgla są związane nie tyle z niebezpieczeństwem szybszego wyczerpania zasobów węgla kamiennego, które — jak widzimy — są jeszcze bardzo wielkie, lecz technicznymi trudnościami związanymi ze zwiększeniem wydobycia, a niekiedy ich niedogodnym położeniem oraz zwiększającym się wciąż zapotrzebowaniem węgla do innych celów (czarna metalurgia i chemia).

Rys. 19. Układ siłowni z „parującym” reaktorem



W związku z tymi faktami podana wyżej ocena zasobów paliw jądrowych według danych Amerykańskiej Komisji Atomowej (AEC) wydaje się wyraźnie za niską.

Przed drugą wojną światową za najbogatsze złoża rudy uranowej uważano złoża w prowincji Katanga w Kongu Belgijskim oraz w Kanadzie w rejonie jeziora Atabaska i jeziora Niedźwiedziego; w Europie najbogatsze znane złoża znajdowały się w rejonie Jachimowa w Czechosłowacji. Zasadniczym źródłem uranu w Stanach Zjednoczonych jest obecnie karnotyt $K_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$. Bogate złoża tego minerału występują na wyżynie Colorado, w stanach Utah oraz Colorado, na przestrzeni ok. 100 000 km². Przeciętna zawartość U_3O_8 wynosi w tych karnotytach kilka dziesiątych procentu. W Szwecji wydobywany jest uran z łupków bitumicznych w rejonie Kolm. Koncentracja uranu jest tu niewielka i wynosi ok. 250 g uranu na tonę łupków, uzasadnia jednak eksploatację. Łupki bitumiczne są, jak wiadomo, minerałem bardzo rozpowszechnionym na ziemi.

Obecne wydobywanie uranu może być ocenione na 1500 t rocznie. Z tej ilości uranu, wyzyskując jedynie uran U 235 w reaktorze pierwotnym, można byłoby pokryć mniej więcej 1/5 obecnej produkcji energii, a jeżeli wyzyskać cały uran w reaktorze wtórnym, to wystarczyłoby około 130 t dla pokrycia światowego zapotrzebowania energii elektrycznej.

Możliwość wyzwolenia energii atomowej z uranu od razu zwiększyły światowe zasoby energetyczne 20-krotnie, a jeżeli uwzględnić również zasoby toru, to 60-krotnie. Te cyfry określają w dużym stopniu rolę, którą wyzyskanie energii jądrowej może odegrać w bliskiej przyszłości. Obecnie znajdujemy się w okresie bardzo intensywnych badań i rozwijania prac konstruktorskich nad pierwszymi prototypami przemysłowymi.

Podane wyżej projekty elektrowni atomowych wykazują jeszcze wysokie koszty zakładowe w stosunku do zwykłych elektrowni ciepłych. Można jednak przewidywać, że wkrótce po uzyskaniu doświadczenia ruchowego z pierwszych uruchomionych instalacji koszty te szybko będą obniżać się i spadną poniżej odpowiednich kosztów elektrowni parowych. Okres ten jednak musi potrwać jeszcze szereg lat. Po tym okresie można oczekiwać szerokiego zastosowania elektrowni atomowych przede wszystkim w uprzemysłowionych krajach pozbawionych swoich źródeł energetycznych lub zbliżających się do ich pełnego wyzyskania, jak np. w Szwajcarii, Italii, Szwecji.

Elektrownie takie mogłyby powstawać przy tworzeniu nowych okręgów przemysłowych, położonych tysiące kilometrów poza zasięgiem istniejących układów energetycznych i nie mających własnych źródeł energii (węгля lub spadków wodnych), np. dla eksploatacji złóż mineralnych położonych w tych rejonach itd.

7. Wnioski.

Wydarta naturze przez człowieka wielka tajemnica, związana z wyzwoleniem nieobjętych umysłem — kosmicznych wprost — ilości skoncentrowanej w materii energii, rozszerza wielokrotnie — praktycznie do niewyczerpywalnych rozmiarów — surowcowe źródła energetyczne ludzkości i stwarza zupełnie nowe, nie przewidywane dotąd możliwości rozwoju produkcji przemysłowej, a tym samym wzrostu sił wytwórczych na naszym globie. Ta sama jednak energia wykorzystana przez nieodpowiedzialnych awanturników wojennych może stać się dla całej ludzkości powodem strasznego — nieobliczalnego w swojej skali — nieszczęścia.

Obecnie prowadzone są wszędzie niezwykle intensywne badania naukowo-laboratoryjne nad możliwością praktycznego wykorzystania energii jądrowej. Można uważać, że znajdujemy się na progu rozwiązania tego zagadnienia w skali przemysłowej. We Francji, Holandii, Norwegii, Szwecji i Kanadzie pracują reaktory atomowe w skali laboratoryjnej, a niekiedy i przemysłowej, szereg innych państw planuje uruchomienie reaktorów w najbliższym czasie. W ostatnich latach USA i Anglia na podstawie szeroko realizowanego programu prac badawczych wstąpiły w stadium wyzyskania przemysłowego energii atomowej i budowy elektrowni atomowych. Związek Radziecki już latem ub. r. podał do wiadomości o uruchomieniu pierwszej na świecie elektrowni atomowej w skali przemysłowej.

Można się spodziewać, że najbliższe lata będą okresem intensywnego poszukiwania najekonomiczniejszego układu i rozwiązywania konstrukcyjnego siłowni atomowej. Podane w niniejszej pracy przykłady, chociaż jeszcze w większości nie zrealizowane w praktyce, dają pewien pogląd na dużą roz-

maitość i różnorodność możliwych rozwiązań. Warunkami pomyślnego rozwiązania wielkiej ilości piętrzących się problemów naukowych i technologicznych, koniecznych do praktycznego zastosowania energii atomowej na wielką skalę przemysłową, są:

- 1) możliwość centralnego koordynowania i planowego prowadzenia prac badawczo-naukowych w wielu dziedzinach nauki i poczyniach przemysłowych w szeregu gałęzi przemysłu, a przede wszystkim w przemyśle chemicznym, metalurgii nowych metali, budowie maszyn i urządzeń itd.;

- 2) szeroko rozwinięty front badań naukowych w dziedzinie fizyki atomowej, chemii i metalurgii, prowadzony równolegle przez wiele organizacji naukowych;

- 3) posiadanie potężnej bazy surowcowej i przemysłowej.

Dwoma ostatnimi z tych czynników Związek Radziecki dysponuje w nie mniejszym stopniu niż największe kraje świata kapitalistycznego, pod względem zaś możliwości centralnego koordynowania szerokiego frontu prac naukowo-badawczych i przemysłowych ma dzięki swemu ustrojowi zdecydowaną przewagę nad całym światem kapitalistycznym; toteż nadzieje niektórych rządów imperialistycznych na możliwość utrzymania tajemnicy atomowej przez jedno państwo nie mają podstaw obiektywnych. Pogląd ten wyrażała zresztą grupa postępowych uczonych amerykańskich i angielskich jeszcze w 1946 r. Ostatnie lata dowiodły słuszności tego poglądu dostatecznie dobitnie.

Dla Polski problem energetycznego wyzyskania energii atomowej, może nieco mniej ostry w tej chwili ze względu na nasze bogate zasoby węгля kamiennego, posiada jednak również wielkie znaczenie. Polsce, ze względu na gospodarkę międzynarodową, może opłacać się produkcja pewnej ilości energii elektrycznej i ciepła z paliwa jądrowego i zwolnienie w ten sposób odpowiednich ilości węгля dla eksportu i przeróbki chemicznej. Prócz tego produkowane w reaktorach atomowych izotopy promieniotwórcze mają ważne zastosowanie w medycynie, biologii, rolnictwie i do różnych celów przemysłowych. Dlatego wydaje się bardzo celowe postawienie sobie w programie prac, związanych z praktycznym wykorzystaniem energii atomowej, rozwinięcia naukowo-badawczych prac w dziedzinie fizyki atomowej jednocześnie w kilku wyższych instytucjach naukowych. Toteż z uznaniem należy powitać inicjatywę Związku Radzieckiego, który udostępni nam i innym państwom bloku demokratycznego badania nad energią jądrową przez szybkie uruchomienie reaktora atomowego.

Komunikat Rady Ministrów ZSRR, ogłoszony w naszej prasie dnia 18 stycznia br. stwarza przed nauką i techniką polską zupełnie nowe możliwości przyspieszenia praktycznego zastosowania energii atomowej. Pomoc ZSRR w tej dziedzinie umożliwi wielokrotne skrócenie okresu studiów i pozwoli uniknąć bardzo długich i żmudnych prac wstępnych, umożliwiając od razu przystąpienie do budowy reaktora w skali przemysłowej o mocy cieplnej do 5000 kW i uruchomienie go w ciągu 2—3 lat.

LITERATURA

- S z c z e n i o w s k i S z. Energia atomowa (Przegl. Elektr., 1947, z. 5/6, str. 131—145 oraz z. 7/8, str. 210—220).
- S z p o l s k i E. W. Atomnaja fizika
- F r i d l e n e r i K e n e d i D z. Wwiedzenie w radiochemię, 1952
- G u d m e n K. Nauczajcie i techniczskie osnowy jadernoj energietiki, t. I, II, 1950
- K o r s u n s k i M. J. Atomnoje jadro, 1952
- S m y t h H. D. Atomic Energy, 1945
- B l a t o n J. Energia jadra atomowego, 1948
- B r o d a E. Energia atomowa, 1951
- Kraftwerksplanungen zur Ausnutzung der Atomenergie (VDI, 1954, 13)
- W e a v e r C. H. Basic Design of First Central Station Nuclear Power Plant (Combustion, 1954, 6)
- International Nuclear Engineering Congress (Combustion, 1952, 6; 1953, 6)
- S m y t h H. D. Development of Nuclear Power for Peaceful Purposes (Combustion, 1954, 4)
- L a n d i s J. W. The Nature of Nuclear Power (Electr. Engineering, 1953, IX)
- M a n s o n B. Chemical Engineering Aspects of Nuclear Power (Industr. and Engin. Chemistry, 1953, 11)
- H a n l e W. Die Ausnutzung der Atomenergie (VDI, 1953)
- Z i n n W. H. Nuclear Power Generation (Electric Light and Power, 1952, X)
- S c h u l t z M. A. Nuclear Power Plant Control Consideration (Electr. Engineering, 1954, V)
- L e c l a i r. Present Feasibility of a Nuclear Power Plant (Electr. Engineering, 1953, VIII)
- L e n z W. Die Gewinnung elektrischer Energie aus Atomenergie (Brennstoff-Wärme Kraft, 1954, 3)
- K i m b l e G. H. T. and S i n c l a i r M. H. The Occurrence of Uranium (Nucleonics, 1950, 4)
- W i m m e n a u e r W. Die Lagerstätten des Urans, ÖTZ, 1954, 9

MGR INŻ. OLGIERD WOŁCZEK
Instytut Fizyki Uniwers. Warsz.

Reaktory jądrowe do wytwarzania energii elektrycznej*)

621.384.6:621.3

Treść. Reaktory jądrowe stosuje się do produkcji ciepła, które przekształca się następnie w energię elektryczną. Omówiono zasady działania reaktorów, technologię ich materiałów konstrukcyjnych oraz zasadnicze typy reaktorów, używanych w energetyce jądrowej.

Ядерные реакторы для производства электрической энергии. Реакторы применяются для производства тепла, которое затем превращается в электрическую энергию. Принципы действия реакторов; технология применяемых в них конструкционных материалов; основные типы реакторов, применяемых в ядерной энергетике.

Nuclear reactors for electric power generation. Nuclear reactors are used in the production of heat for the subsequent conversion into electric power. Review of the principles of reactor operation, technology of the requisite constructional materials and leading reactor types used in nuclear power practice.

1. Wstęp.

27 czerwca 1954 r. uruchomiono — jako pierwszą na świecie — radziecką elektrownię „atomową”; moc jej wynosi 5 MW; w stadium projektów i budowy znajdują się większe obiekty, sięgające 50 i 100 MW. Fakty te są zastanawiające, jeśli sobie uprzytomnić, że pierwszy reaktor jądrowy, zasadniczą część wszystkich siłowni „atomowych”, uruchomiono 12 grudnia 1942 r., a więc przed niespełna 12 laty. Moc jego była znikoma, bo zaledwie 0,5 W.

Dla większego kontrastu warto zaznaczyć, że w 1951 r. zaczęto pompy i oświetlenie reaktora EBR w Arco (centrum badań nad reaktorem w St. Zjedn.) zasilać energią elektryczną, uzyskaną z energii jądrowej**), wyzwalanej w tym samym reaktorze. Według ostatnich wiadomości moc jego wynosi obecnie 0,25 MW, a zatem 20 razy mniej niż moc radzieckiej elektrowni atomowej.

Przewaga Związku Radzieckiego na tym polu wynika stąd, że Stany Zjednoczone zainteresowane są zasadniczo w produkcji broni atomowej i cel ten pochłania lwią część środków materialnych. Ponadto wielkie zasoby węgla, ropy naftowej i energii wodnej, stanowiące tanie źródła energii elektrycznej, wybitnie hamują w USA zainteresowanie nowym i nie opanowanym jeszcze całkowicie środkiem, wymagającym — jak dotychczas — dużych nakładów inwestycyjnych.

2. Łańcuchowa reakcja rozszczepiania jąder atomowych.

Ciężkie jądra atomowe (uranu, plutonu itp.) na skutek bombardowania różnymi cząstkami, jak np. neutronami czy protonami, a niekiedy nawet samorzutnie mogą ulec tzw. rozszczepieniu. Polega ono na rozpadzie jądra na dwie części o zbliżonych masach. Reakcji rozszczepiania jąder uranu i plutonu towarzyszy wyzwolenie znacznej energii. Jednocześnie są tu wyrzucane 2—3 neutrony o dużych prędkościach.

Uran naturalny stanowi mieszaninę trzech odmian zwanych izotopami. Z punktu widzenia energetyki ważne są dwa z nich: $^{238}_{92}\text{U}$ (99,3%) i $^{235}_{92}\text{U}$ (0,7%). Jądra pierwszego izotopu ulegają rozszczepieniu tylko pod wpływem szybkich neutronów (energia kilku megaelektronowoltów). Jądra $^{235}_{92}\text{U}$ są rozszczepiane przez neutrony o dowolnych prędkościach; najskuteczniej reakcja rozszczepiania przebiega tu jednak z neutronami bardzo powolnymi, tzw. termicznymi (energia 0,025 eV). Sztucznie wytwarzany pluton (izotop $^{239}_{94}\text{Pu}$) zachowuje się podobnie do $^{235}_{92}\text{U}$.

Oprócz tych pierwiastków otrzymuje się obecnie sztuczny izotop ^{233}U . Wytwarza się go z toru naturalnego ^{232}Th w analogiczny sposób jak $^{239}_{94}\text{Pu}$ z $^{238}_{92}\text{U}$. ^{233}U ulega rozszczepieniu podobnie do $^{235}_{92}\text{U}$ i $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Neutrony wyzwalane podczas reakcji rozszczepiania mogą spowodować analogiczną przemianę w jądrach sąsiednich; w ten sposób reakcja raz zapoczątkowana rozprzestrzenia się na całą masę danego pierwiastka i dlatego nazywamy ją wtedy łańcuchową.

W bryle złożonej z samego uranu naturalnego łańcuchowa reakcja rozszczepiania nie może się rozwinąć. Neutrony bowiem wyzwolone z jąder uranu szybko ulegają zwolnieniu

i nie są już wówczas zdolne do rozszczepiania dalszych jąder $^{238}_{92}\text{U}$, lecz są wtedy szczególnie łatwo wychwytywane przez te właśnie jądra (gdy energia neutronów wynosi kilka elektronowoltów). W toku następujących przemian powstaje nowy pierwiastek pluton ($^{238}_{92}\text{U} (n, \gamma) \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}\text{Pu}$). Prawdopodobieństwo rozszczepienia jąder $^{238}_{92}\text{U}$ przez owe zwolnione neutrony jest bardzo małe ze względu na znikomą zawartość tego izotopu.

Znamy obecnie cztery sposoby podtrzymania reakcji łańcuchowej:

a) tak wzbogacić uran w jego izotop $^{235}_{92}\text{U}$, żeby pochłanianie neutronów przez $^{238}_{92}\text{U}$ nie odgrywało poważniejszej roli;

b) tak szybko zwalniać neutrony (zmniejszać ich prędkość), żeby wkrótce po wyzwoleniu stawały się termicznymi, wtedy nie mogą one ulec pochłonięciu przez jądra $^{238}_{92}\text{U}$, będą natomiast skutecznie rozszczepiać jądra $^{235}_{92}\text{U}$;

c) produkować $^{239}_{94}\text{Pu}$ z $^{238}_{92}\text{U}$ i w tym sztucznym, łatwo rozszczepialnym pierwiastku nadal przeprowadzać reakcję łańcuchową;

d) produkować $^{233}_{92}\text{U}$ z $^{232}_{90}\text{Th}$ w reaktorze wzbogaconym w $^{235}_{92}\text{U}$ i w tym nowym sztucznym izotopie rozszczepialnym nadal prowadzić reakcję łańcuchową.

3. Elementy konstrukcyjne reaktorów jądrowych.

Zasadniczą częścią składową reaktora jądrowego, w którym realizuje się łańcuchowa reakcja rozszczepiania jest materiał rozszczepialny — uran lub pluton. Drugi element konstrukcyjny stanowi spowalniacz (moderator), służący do zwalniania neutronów: grafit, beryl, ciężka woda, zwykła woda. Elementu tego nie ma jedynie w reaktorach na szybkie neutrony (z uranem wzbogaconym w izotop $^{235}_{92}\text{U}$ lub plutonem Pu).

Każdy reaktor otoczony jest z wierzchołkiem, zbudowanym z takiego samego materiału co spowalniacz. Zwierciadło odbija dużą ilość neutronów z powrotem do wnętrza, przeciwdziałając ich ucieczce i zwiększając w ten sposób skuteczność procesów rozszczepiania.

Niekontrolowana łańcuchowa reakcja rozszczepiania jąder ma charakter lawinowy, jak przy wybuchu bomby atomowej. W reaktorach reakcję tę reguluje się za pomocą sztabek kontrolnych, wykonanych z materiałów silnie pochłaniających neutrony, jak kadm, bor, stal borowa, a ostatnio hafn. Niezależnie od nich nad każdym reaktorem wiszą sztabki bezpieczeństwa z tego samego materiału co sztabki kontrolne. Wpadają one samoczynnie do wnętrza reaktora, gdy z jakichkolwiek powodów, pomimo obecności sztabek kontrolnych, reakcja łańcuchowa przebiegać zaczyna lawinowo lub gdy zawiedzie układ chłodzący.

Wszystkie reaktory (z wyjątkiem najmniejszych) są wyposażone w układ chłodzący. Do chłodzenia stosuje się gazy (powietrze, dwutlenek węgla, azot, hel) i ciecze (wodę, ciężką wodę oraz ciekłe metale, jak rtęć, sód itp.). Każdy reaktor jest otoczony odpowiednimi osłonami, które zabezpieczają obsługę przed szkodliwymi i bardzo przenikliwymi promieniami. Wykonuje się je głównie z betonu, lecz stosuje się również wodę i ciężkie metale (ołów, bismut).

4. Uwagi technologiczne.

Materiały rozszczepialne. Główny materiał stanowi jak dotąd uran. W naturze jest on dosyć rozpowszechniony, jednakże przeważnie występuje pod postacią

*) Materiał podstawowy czytelnik znajdzie w obszernej pracy prof. Sz. Szczeniowskiego pt. Energia atomowa (Przegl. Elektr., 1947, z. 5/6, str. 131—145, oraz z. 7/8, str. 210—220). Ob. również artykuł autora pt. Stosy atomowe i możliwości zastosowania ich do wytwarzania energii elektrycznej (Przegl. Elektr., 1952, z. 9, str. 353—358).

**) Pospolicie zwanej atomową.

bardzo drobnych domieszek. Wysokoprocentowe rudy uranowe znajdują się jedynie w Związku Radzieckim, Kongu Belgijskim, Kanadzie, Stanach Zjednoczonych Ameryki i w Australii.

Minerały naturalne poddaje się złożonej przeróbce chemicznej. W ostatecznej fazie produkcji otrzymuje się uran metaliczny pod postacią proszku, który odznacza się przede wszystkim wybitną skłonnością do zapalania w powietrzu, wielką przeto trudność stanowi przeróbka go na sztaby, tj. na postać, w której ładuje się go do reaktora.

Uran pierwiastkowy jest bardzo czynny pod względem chemicznym. Łatwo reaguje zarówno z tlenem, jak i azotem atmosfery, zwłaszcza w podwyższonej temperaturze, a także z wodą i z wielu innymi substancjami. Z tych powodów sztaby uranowe poddaje się bardzo trudnemu do opanowania procesowi p u s z k o w a n i a. Polega on na zamknięciu uranu w metalowych osłonach, których materiał musi w jak najmniejszym stopniu pochłaniać neutrony, nie podlegać korozji i wytrzymywać jak najwyższe temperatury. Dotychczas stosowano tu zasadniczo glin, odznaczający się dobrą odpornością na korozję i spełniający swą rolę w reaktorze w sposób zadowalający. Ostatnio wypróbowano osłony z cyrkonu. Odznaczają się one, oczywiście, znacznie większą odpornością chemiczną i wytrzymałością termiczną i choć są stosunkowo drogie, użycie ich stanowi poważne osiągnięcie techniki jądrowej i umożliwiło stosowanie znacznie wyższych temperatur roboczych niż w wypadku glinu.

Sam proces puszkowania wymaga bardzo dużo pracy. Cykl produkcyjny składa się z ponad 50 operacji, wliczając w to pomiary fizycznych własności osłoniętych elementów paliwa jądrowego. Dotychczas stanowi on jedną z najbardziej otoczonych tajemnicą faz produkcji.

Uran ulega w reaktorze najrozmaitszym przemianom. Przede wszystkim gromadzą się w nim wielkie ilości produktów rozszczepienia. Można je uważać za rodzaj „popiołów”. Wychwytyują one neutrony i tłumią reakcję łańcuchową. Zjawisko to nazywamy s a m o z a t r u w a n i e m reaktora. Oprócz tego drobne ilości uranu przeobrażają się na znanej drodze w pluton. Z tych powodów po upływie pewnego — najkorzystniejszego — czasu trzeba sztaby uranowe reaktora zastępować świeżymi.

Napromienione sztaby umieszcza się w specjalnych, betonowych zbiornikach wody, gdzie w ciągu kilku miesięcy tracą one znaczną część swojej promieniotwórczości. Dopiero wtedy można je poddać dalszej przeróbce chemicznej, polegającej na rozpuszczaniu sztab w kwasie i na ekstrakcji uranu oraz plutonu za pomocą odpowiednich rozpuszczalników organicznych.

Uran z napromienionych sztab nie nadaje się do bezpośredniego użytku w reaktorach, gdyż wykazuje zmniejszoną zawartość izotopu ^{235}U , toteż należy go poddać procesowi wzbogacania w specjalnych k a s k a d a c h e f u z y j n y c h, które służą również do wytwarzania uranu znacznie wzbogaconego w izotop ^{235}U , a nawet do produkcji prawie czystego ^{235}U .

M a t e r i a ł y s p o w a l n i a c z y i z w i e r c i a d e ł to głównie grafit, beryl, ciężka woda i zwykła woda.

Grafit, odmianę krystaliczną węgla pierwiastkowego, wytwarza się w piecach elektrycznych lub wydobywa pod postacią kopaliny. Największą trudność technologiczną stanowi tu konieczność uwolnienia materiału od wszelkich domieszek pochłaniających neutrony, zwłaszcza — od boru.

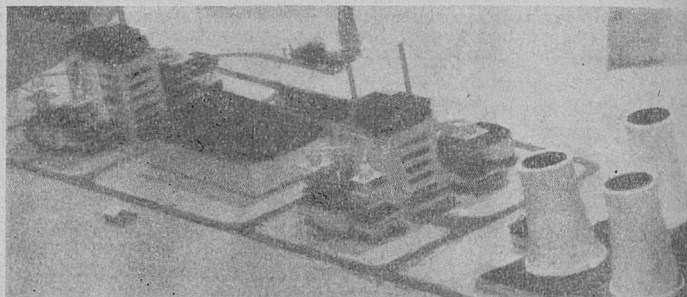
Beryl jest bardzo dobrym spowalniaczem, jednak odznacza się silną toksycznością (porównywalną z arszenikiem), toteż jego produkcja natrafia na wielkie trudności i dotychczas nie mogła rozwinąć się na większą skalę.

Ciężka woda (D_2O) stanowi naturalny składnik zwykłej wody (0,017%). Otrzymuje się ją zatem z wody naturalnej na drodze rozmaitych procesów wzbogacania (elektroliza, rektyfikacja, katalityczna wymiana chemiczna). Światowa produkcja ciężkiej wody sięga setek, jeżeli nie tysięcy ton rocznie (Norwegia wytwarza rocznie 25 t, Szwajcaria 0,32 t).

*) Jądro atomowe zwykłego wodoru, czyli protu H, stanowi 1 proton. Jądro ciężkiego wodoru, czyli deuteru D, zawiera 1 proton i 1 neutron, deuter jest więc pod względem chemicznym wodorem jak prot. Z powodu znacznej różnicy mas oba izotopy mają nieco odmienne własności.

Zwykła woda stanowi doskonały spowalniacz ze względu na wybitną zdolność protu do hamowania neutronów, lecz prot ma tę wadę, że jego jądra odznaczają się skłonnością do wychwytywania neutronów. Dlatego przy stosowaniu zwykłej wody w reaktorach traci się pewną ilość neutronów, co jest niepożądane. Pomimo tej wady woda zwykła znalazła zastosowanie jako spowalniacz w reaktorach z uranem wzbogaconym w izotop ^{235}U dzięki swej taniości i dostępności.

S r o d k i c h ł o d z ą c e. W grę wchodzi tu przede wszystkim powietrze, dwutlenek węgla, woda i metale ciekłe.



Rys. 1. Makieta elektrowni jądrowej o mocy 40 MW

W środku widać płaski prostokątny główny budynek elektrowni zawierający 4 turbogeneratory. Reaktory mieszczą się w dwu wysokich budynkach z kominami (przed i za głównym budynkiem elektrowni). Dwutlenek węgla, ogrzany w reaktorach, odprowadzany jest widocznymi na rysunku przewodami do 8 pionowych kotłów parowych, znajdujących się w niskich skrzydłach bocznych pomieszczeń reaktorów. Po prawej stronie widać wieżę do chłodzenia skroplin z turbin.

Powietrze jest używane w całym szeregu reaktorów. Jednakże, w porównaniu z wodą, stanowi ono lichi środek chłodzący ze względu zarówno na swą małą gęstość, jak i na przewodnictwo cieplne. Na skutek tego reaktor chłodzony powietrzem musi mieć duże powierzchnie służące do przenoszenia ciepła. Powierzchnie elementów paliwowych (sztab uranowych), nad którymi przepływa powietrze, muszą mieć wysoką temperaturę dla skutecznej wymiany ciepła.

To samo dotyczy dwutlenku węgla, który jest brany w rachubę w projekcie budowanej obecnie w Calder Hall (Wielka Brytania) większej elektrowni atomowej (rys. 1). Zaletą jego jest między innymi mniejsza czynność chemiczna i większa gęstość w porównaniu z powietrzem.

Woda stanowi środek chłodzący często używany w reaktorach. Ponieważ woda jest jednocześnie dobrym spowalniaczem, można jej używać jedynie w reaktorach na powolne neutrony. Poza tym niska temperatura wrzenia wody stanowi poważne ograniczenie. Konieczność stosowania wysokich temperatur przy produkcji energii zmusza do wytwarzania wysokich ciśnień w obrębie konstrukcji reaktora (np. w reaktorze do napędu łodzi podwodnej). Powoduje to oczywiście trudności, a ponadto zmniejsza bezpieczeństwo.

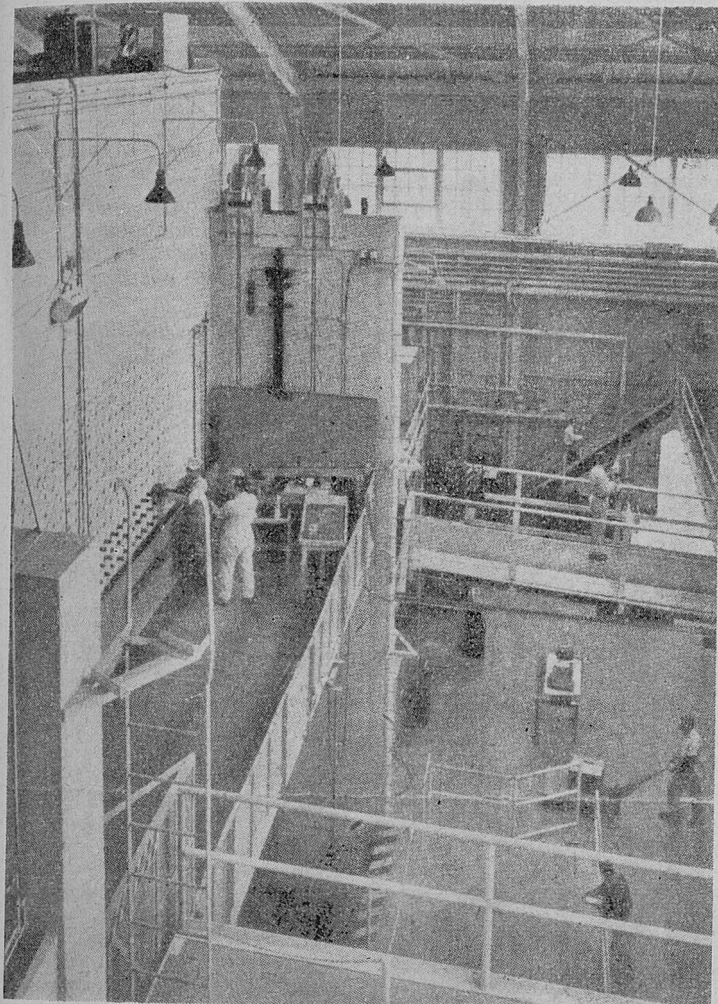
Ciekłe metale stanowią obiecujące środki chłodzące. Dużo uwagi poświęca się zwłaszcza lekkim metalom — sodowi, potasowi i ich stopom. Sód gwałtownie reaguje z wodą, jednakże używając go jako środka chłodzącego, można go zupełnie odizolować od wody (i pary wodnej powietrza), ma on natomiast wiele dodatnich własności: jest łatwo dostępny (z soli kuchennej), jego produkcja światowa przekracza 100 tys. ton. Sód odznacza się dużym przewodnictwem cieplnym i niską prężnością pary, można go więc użyć do odbierania ciepła przy wysokiej temperaturze wewnątrz reaktora, bez stosowania wysokich ciśnień. Dzięki temu mechaniczna konstrukcja reaktora jest znacznie prostsza i tańsza.

Tablica I. Względne zapotrzebowanie mocy dla pomp przy różnych środkach chłodzących

Środek chłodzący	Względne zapotrzebowanie mocy przez pompy
Sód	0,20
Bizmut	1,00
Rtęć	1,07
Ołów	1,31
Para wodna (10 at)	3800
Hel (10 at)	5400
Powietrze (10 at)	11900

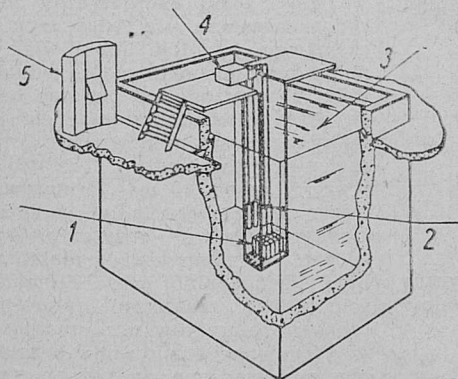
Sód ma małą gęstość przy dużym przewodnictwie cieplnym. Toteż pobór mocy przez pompy obiegu chłodniczego jest tu bardzo mały (tabl. I). To samo można powiedzieć o innych metalach ciekłych.

Obecnie chłodzenie reaktorów ciekłym sodem opanowano już na skalę techniczną. Nauczono się oczyszczać go, przepompowywać w obiegu zamkniętym i operować nim bezpiecznie w stosunkowo dużych instalacjach.



Rys. 2. Widok frontu wielkiego reaktora grafitowego

Rtęć nadaje się tylko do reaktorów na szybkie neutrony (z uranem wzbogaconym w ^{235}U lub z plutonem), gdyż pochłania te ostatnie jedynie w nieznacznym stopniu. Rtęć sto-



Rys. 3. Schemat reaktora typu „basenu kąpielowego”

- 1 — siatka uranowa
- 2 — sztaby kontrolne i sztaby bezpieczeństwa
- 3 — poziom wody
- 4 — mechanizm sterujący
- 5 — rozdzielnia

sowana przez 6 lat w reaktorze plutonowym dała, jak się zdaje, wyniki zadowalające.

Temperatury robocze. Ze względu na szkodliwe, strukturalne zmiany w materiałach konstrukcyjnych w podwyższonych temperaturach oraz na skutek wydatnie zwiększonej korozji chemicznej i promieniotwórczej, temperatury robocze reaktorów powinny być możliwie niskie. Z drugiej jednak strony sprawność siłowni cieplnej wzrasta z temperaturą, z ekonomicznego przeto punktu widzenia należałoby stosować możliwie wysokie temperatury robocze. Konieczne jest więc znalezienie kompromisu.

Pewną ilustracją wpływu temperatury roboczej na koszt energii elektrycznej może być zestawienie podane w tabl. II.

Sterylizacja zdalna. Bardzo istotną sprawą jest opanowanie pracy z materiałami silnie promieniotwórczymi. Wiele materiałów, które znajdowały się wewnątrz reaktorów, wykazuje tak silną promieniotwórczość, że nie można operować nimi ręcznie, czy za pomocą szczypiec laboratoryjnych, nawet przez sekundy bez znacznego uszczerbku dla zdrowia. Toteż powstała konieczność skonstruowania urządzeń, umożliwiających pracę na odległość, za dostatecznie grubymi osłonami. Wymiana uszkodzonych elementów reaktora musi odbywać się samoczynnie. Obserwacji dokonuje się za pomocą stereotelewizji. Tego rodzaju praca w silnym polu promieniotwórczym wymaga naturalnie wielkiego nakładu czasu. Na przykład na operację, która w normalnych warunkach pracy ręcznej trwałaby minutę, często trzeba zużyć całą godzinę przy sterowaniu zdalnym.

5. Typy reaktorów *)

Reaktor grafitowy (rys. 2). Jest to bryła zbudowana z bloków grafitowych, stanowiących spowalniacz. W bryle tej są zanurzone sztaby uranowe. Masa grafitu wynosi od kilkuset do wielu tysięcy ton, uranu — od kilkudziesięciu do kilkuset ton.

Wspomniane wyżej reaktory elektrowni znajdującej się w budowie, chłodzone dwutlenkiem węgla, będą właśnie reaktorami grafitowymi. Ich temperatura robocza wyniesie 350—400°C. Sprawność elektrowni oblicza się na 20÷25%.

Reaktor z ciężką wodą. Jest to cylindryczny zbiornik z ciężką wodą, w którym wiszą pionowo sztaby uranowe **). Ciężka woda stanowi jednocześnie spowalniacz i środek chłodzący, krążący w zamkniętym obiegu pierwotnym. Ciepło odbierane jest od niej przez czynnik chłodzący obiegu wtórnego. Masa ciężkiej wody wynosi od kilku do kilkunastu ton, masa uranu jest tego samego rzędu wielkości (nieco mniejsza).

Reaktor ze zwykłą wodą. Przykładem tu może być reaktor typu „basenu kąpielowego”. Jest to czworokątny zbiornik wykonany z betonu (rys. 3). Wypełnia go woda. W wodzie tej znajduje się układ sztab wykonanych z izotopu ^{235}U . Układ zawieszony jest od góry na ruchomym mostku przerzuconym nad stosem. Woda służy tu jednocześnie jako spowalniacz, środek chłodzący i osłona. Ma ona jeszcze tę zaletę, że można przez nią obserwować wnętrze reaktora. Masa uranu w reaktorze o mocy 100 kW wynosi zaledwie 3 kg.

Na razie nie jest znany żaden przykład czynnego reaktora energetycznego ze zwykłą wodą. Projektuje się natomiast budowę elektrowni o mocy 60 MW z takim reaktorem. Nie oczekuje się, że ten stos dostarczy energii elektrycznej po koszcie porównywalnym z ceną energii produkowanej przez elektrownię węglową, jednakże studia nad nim umożliwią najprawdopodobniej redukcję kosztów w dalszych z kolei reaktorach.

Reaktor jednorodny. Wszystkie rozważane dotychczas reaktory były niejednorodne, stanowiły bowiem coś w rodzaju siatki przestrzennej, w której materiał rozszczepialny przeplatał się ze spowalniaczem. Jeśliby natomiast materiał ten był wymieszany ze spowalniaczem tak, że tworzyłyby one jednolitą substancję, to reaktor byłby jednorodny.

Przykład takiego reaktora stanowi tzw. „kocioł” **), w którym uran wzbogacony w izotop ^{235}U znajduje się pod po-

*) Por. Wolczek O. Stosy atomowe i możliwości zastosowania ich do wytwarzania energii elektrycznej (Przegl. Elek., 1952, z. 9, str. 353—358).

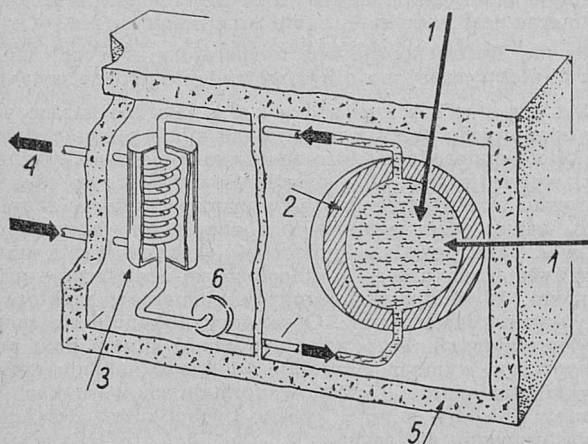
**) Rysunek ob. w Przegl. Elek., 1952, z. 9, str. 356, rys. 4.

***) Rysunek ob. w Przegl. Elek., 1952, z. 9, str. 357, rys. 7.

stacją roztworu wodnego soli (azotanu lub siarczanu uranylu). Materiałem rozszczepialnym jest tu uran, a spowalniaczem woda.

W reaktorze-kotle materiał rozszczepialny pozostaje zasadniczo w stanie spoczynku. Wytworzone ciepło odbierane jest przez wodę obiegającą spiralę układu chłodzącego, umocowaną wewnątrz zbiornika z roztworem soli uranu.

W energetycznym reaktorze jednorodnym stosuje się nieco inny układ (rys. 4). Mieszanka paliwna (roztwór soli uranu)



Rys. 4. Schemat reaktora jednorodnego z krążącą cieczą mieszkanką paliwną

- | | |
|--|---------------------|
| 1 — bieżąca cieczą mieszkanka paliwna (stop uranu) | 4 — do turbiny |
| 2 — zwierciadło | 5 — osłona betonowa |
| 3 — wymiennik ciepła | 6 — pompa obiegowa |

krąży tu przez reaktor, a wytworzone ciepło oddaje w wymienniku zewnętrznym. Chłodzenie odbywa się zatem poza reaktorem. Poza tym pewna ilość mieszkanki paliwnej (zanieczyszczonej w toku pracy produktami rozszczepienia) odbierana jest w sposób ciągły, oczyszczana chemicznie i następnie znów wprowadzana do obiegu przez reaktor.

Oczywiście, ogromną zaletę reaktora jednorodnego stanowi duża prostota procesu wytwarzania i przeróbki mieszkanki paliwnej. Odpadają tu zupełnie kosztowne i skomplikowane operacje puszgowania i zdejmowania powłoki oraz procesy

ilość wydzielanej energii. Dzięki temu nie są tu konieczne sztaby kontrolne, podobnie jak w reaktorze-kotle.

Przykładem, jedynym zresztą, czynnego energetycznego reaktora „jednorodnego” może być reaktor *) nazywany HRE (rys. 5), który działał przez dwa lata, dostarczając bardzo cennych danych do konstrukcji energetycznych układów jednorodnych. Reaktor ten miał produkować od 0,15 do 0,9 mln kcal/h (0,2 do 1 MW ciepła), przy najwyższej temperaturze paliwa 250°C, wytwarzając przy wymianie ciepła parę nasyconą o ciśnieniu 14 at.

Rdzeń reaktora *) stanowiła kula (rys. 6) ze stali nierdzewnej o średnicy 45 cm. Krążył przez nią roztwór siarczanu uranylu w wodzie destylowanej w ilości 455 l/min. Należy zaznaczyć, że zawierał on uran silnie wzbogacony w izotop ^{235}U ; stężenie ^{235}U przekraczało 90% (zamiast 0,7%). Roztwór w rdzeniu znajdował się pod ciśnieniem 70 at. Ciśnienie to było tak dobrane, aby przekraczało o kilka atmosfer ciśnienie, przy którym wiałaby roztwór materiału rozszczepialnego w temperaturze roboczej 250°C. Jednocześnie było ono konieczne dla zmniejszenia objętości gazów, wytwarzanych we wnętrzu kuli stalowej wskutek procesu rozszczepiania.

Rdzeń otaczało zwierciadło z ciężkiej wody znajdującej się również pod ciśnieniem 70 at. Celem ograniczenia naprężeń termicznych i zmniejszenia korozji kuli stalowej temperatura zwierciadła była regulowana i utrzymywana na poziomie bliskim 180°C.

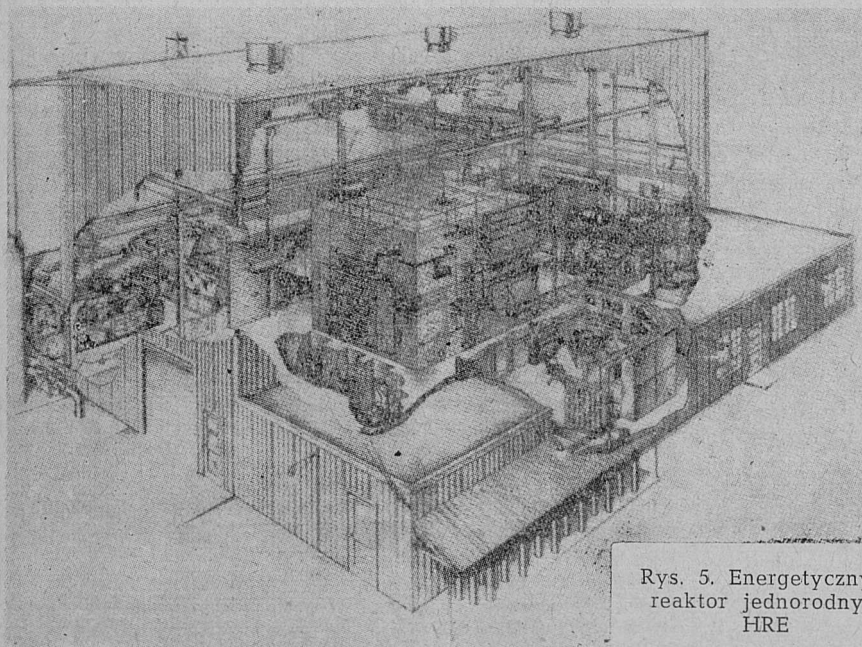
Roztwór z rdzenia, o temperaturze 250°C, przechodził do wymiennika ciepła, gdzie ochładzał się do 210°C. Wytwarzał on tam 1360 kg/h pary o ciśnieniu 14 at. Specjalna pompa odśrodkowa zwracała paliwo do powrotu do rdzenia. Zużycie paliwa rozszczepionego przy pracy ciągłej i przy wydzielaniu 1 MW ciepła wynosiło jedynie 0,0009 kg na dobę.

Wytworzona para poruszała turbinę prądnicy. Był to zwykły turbogenerator o mocy 312 kVA. Przy wydzielaniu 1 MW ciepła z reaktora (250°C) generator dostarczał 0,14 MW energii elektrycznej.

Regulacja pracy urządzenia była samoczynna. Po zwiększeniu obciążenia prądnicy regulator turbiny otwierał zawory regulujące wpływ pary, zwiększając zapotrzebowanie pary, obniżając jej ciśnienie i temperaturę. Powodowało to zwiększone chłodzenie roztworu uranu, co automatycznie zwiększało reaktywność rdzenia i w wyniku całkowicie kompensowało podwyższone obciążenie. Taką przejściową reakcją układu można odczytać na załączonym wykresie (rys. 7). Widać tam zapisy temperatur roztworu rozszczepialnego oraz wydajności cieplnej reaktora w funkcji czasu przy stałym zapotrzebowaniu mocy, szybkim jego spadku i nagłym wzroście. Wykres wykazuje wyraźnie, że reaktor sam utrzymuje równowagę i reaguje na zmiany zapotrzebowania mocy bez pomocniczych urządzeń kontrolnych. Cecha ta odróżnia go zupełnie od wszystkich innych dotąd znanych reaktorów, w tamtych bowiem urządzenia kontrolne regulują stopień zmian mocy, natomiast w reaktorze HRE moc wyznaczona jest jedynie przez prędkość odbioru ciepła.

Dzięki temu energetyczny reaktor jednorodny odznacza się właściwym mu bezpieczeństwem operacji. Jakkolwiek przewidywano to przy projektowaniu, jednak dla ostrożności zaopatrzone go podczas budowy w kilka urządzeń zabezpieczających: 1) do rdzenia reaktora można było wrzucić 2 płytki bezpieczeństwa (równoważne sztabom bezpieczeństwa) w czasie 10 ms; 2) można było spuścić ciężką wodę zwierciadła; 3) można było rozcieńczyć roztwór rozszczepialny (normalny sposób zatrzymywania reaktora); 4) można było odciąć odbiór pary; 5) można było spuścić roztwór rozszczepialny do niżej umieszczonych zbiorników poza reaktorem.

W celu skontrolowania bezpieczeństwa ruchu wprowadzano do rdzenia reaktora uran w sposób nagły — z szybkością 75 g/s. Moc wtedy wzrastała 10⁶-krotnie: z 30 do 11.10⁶W (11 MW) w ciągu 1 s, lecz spadała do normalnego poziomu już po upływie dalszej 0,1 s. W ten sposób wykazano z powodzeniem, że z jądrowe-



Rys. 5. Energetyczny reaktor jednorodny HRE

„studzenia” napromienionych sztab i ich rozpuszczania w celu usunięcia produktów rozszczepienia.

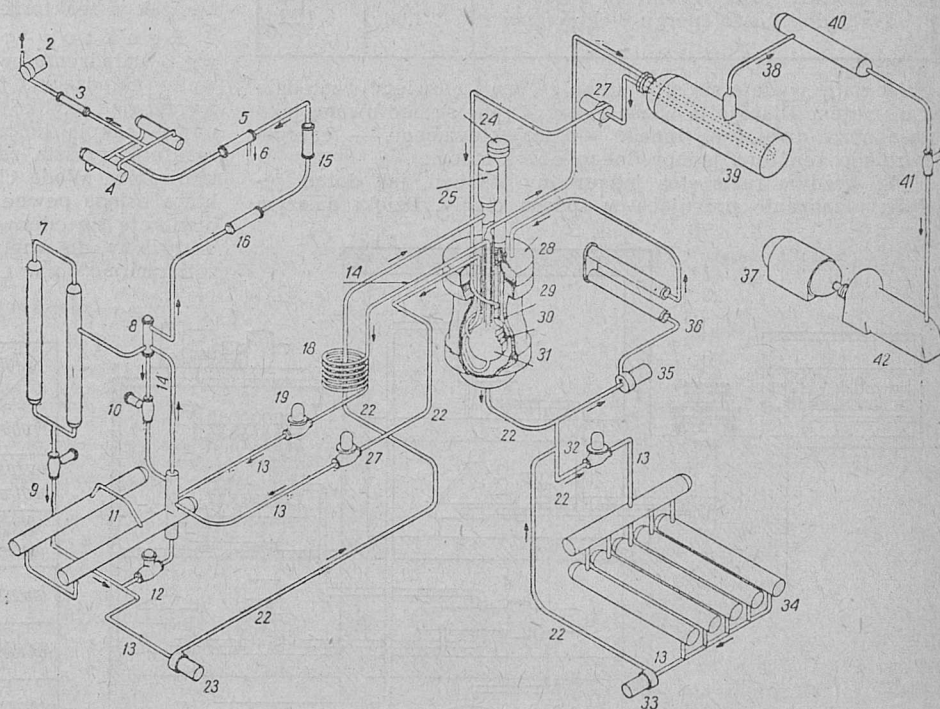
Poza tym reaktor jednorodny jest samo-regulujący. Gdy liczba rozszczepień na jednostkę czasu wzrasta, zwiększa się uwalniana energia. Wówczas temperatura paliwa wzrasta. Wtedy jednak jego reaktywność maleje i spada jednocześnie

*) Chem. Engg. Progr., 50 [1954], nr 5, 257.

go punktu widzenia jednorodny reaktor HRE jest wystarczająco stały dla stawienia czoła większym zmianom warunków pracy niż te, których można oczekiwać na skutek omyłek w regulowaniu ruchu.

Podczas 24-miesięcznej pracy krążenie cieczy przez reaktor trwało 4498 godz. Urządzenie wytwarzało energię elektryczną

- 1 — do komina
- 2 — dmuchawa
- 3 — pochłaniacz gazów promieniotwórczych
- 4 — pułapki (-200°)
- 5 — skraplacz
- 6 — skropliny zwracane do zbiorników paliwa
- 7 — zbiorniki skropliny
- 8 — skraplacz
- 9 — zawór do rozcieńczania paliwa
- 10 — zawór przepuszczający skropliny do zbiorników paliwa
- 11 — zbiorniki paliwa
- 12 — zawór przepuszczający paliwo
- 13 — 1 at
- 14 — wodór, tlen, para wodna gazy promieniotwórcze
- 15 — urządzenie do katalitycznego spalania mieszaniny piorunującej
- 16 — urządzenie do spalania mieszaniny piorunującej
- 18 — chłodnica do gazów
- 19 — zawór redukcyjny
- 22 — 70 at
- 23 — pompa obiegowa do paliwa
- 24 — mechanizm poruszający płytki bezpieczeństwa
- 25 — urządzenie sprężające (do 70 at)
- 27 — zawór zapasowy
- 28 — naczynie ciśnieniowe
- 29 — zwierciadło
- 30 — płytki pochłaniające neutrony
- 31 — rdzeń reaktora
- 32 — zawór przepuszczający D_2O
- 33 — pompa do zasilania układu D_2O
- 34 — zbiorniki D_2O
- 35 — pompa obiegowa do D_2O
- 36 — chłodnica do D_2O
- 37 — prądnicą
- 38 — para 14 at
- 39 — wymiennik ciepła
- 40 — zbiornik pary
- 41 — główny zawór parowy
- 42 — turbina



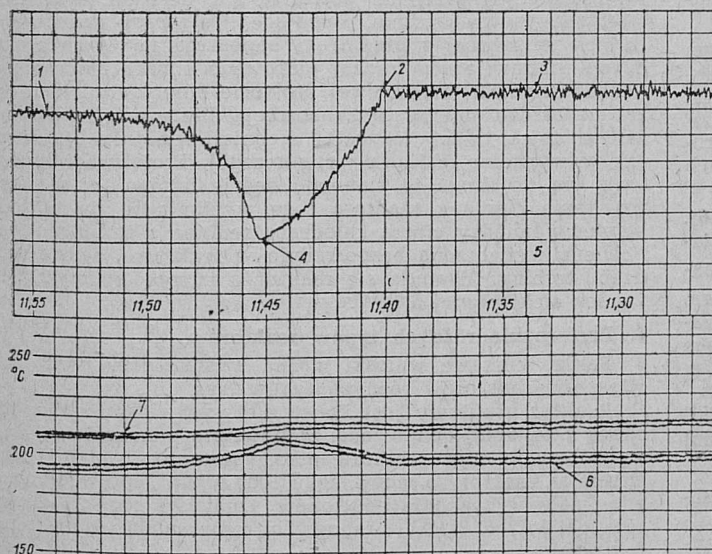
Rys. 6. Schemat reaktora jednorodnego HRE wraz z urządzeniami pomocniczymi (brak jedynie układu oczyszczającego mieszkankę paliwną z produktów rozszczepienia)

w ciągu 1950 godz., przy czym moc przekraczała 0,1 MW przez 720 godz. Moc największa wynosiła 1,6 MW (jeśli pominąć wspomniane skoki do 11 MW w ciągu ułamków sekundy).

Po dwóch latach doświadczeń reaktor HRE rozebrano, gdyż miał on jedynie dostarczyć danych co do możliwości i warunków

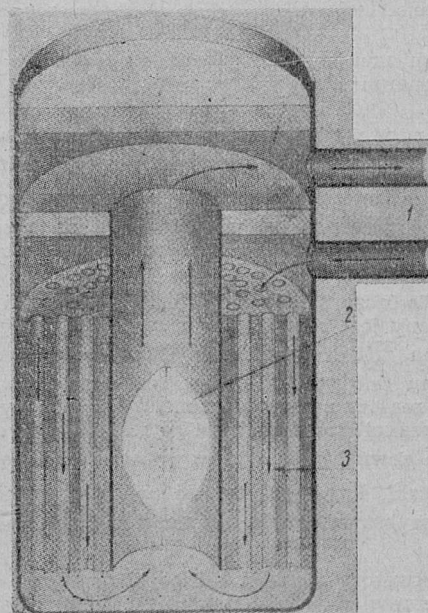
pracy energetycznego reaktora jednorodnego. Uzyskane dodatnie wyniki umożliwiają konstrukcję większej jednostki. Będzie to prawdopodobnie reaktor wytwarzający jedynie 3 MW ciepła. Doświadczenia z nim mają dostarczyć bardzo ważnych informacji co do korozji, oczyszczania chemicznego (od produktów rozszczepienia) i warunków pracy, jakich

można było uzyskać z pomocą reaktora HRE. Następny krok — to konstrukcja reaktora jednorodnego o mocy cieplnej 65 MW, który jednocześnie będzie reaktorem wytwórczym



Rys. 7. Reakcja na zmiany zapotrzebowania mocy (zapisy przyrządów pomiarowych)

- U góry wykres mocy cieplnej reaktora, u dołu zapisy temperatur rozszerzalnego przy wlocie i wylocie z rdzenia reaktora
- 1 — moc ~ 435 kW
 - 2 — zamknięcie zaworu odlotowego pary
 - 3 — moc 475 kW
 - 4 — otwarcie zaworu odlotowego pary
 - 5 — warunki pracy HRE 200°C , 70 at, 23.II.1953
 - 6 — temperatura (w $^{\circ}\text{C}$) na wejściu do rdzenia
 - 7 — temperatura (w $^{\circ}\text{C}$) na wyjściu z rdzenia



Rys. 8. Schemat reaktora wytwórczego

czym (ob. niżej), a mianowicie będzie wytwarzać więcej rozszczepialnego izotopu ^{233}U w osłonie z toru niż zużywać ^{235}U .

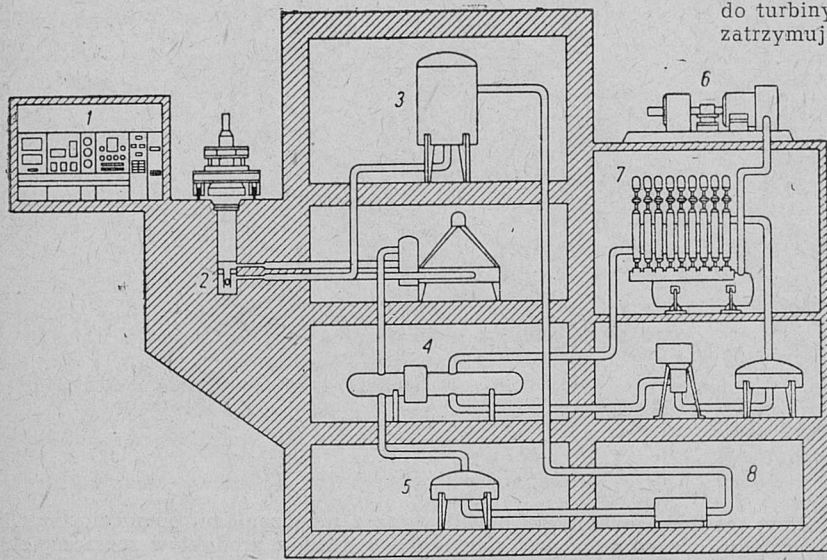
Ponieważ woda ma niską temperaturę wrzenia, co znacznie ogranicza zastosowanie jej w reaktorach służących do produkcji energii użytkowej, rozważa się obecnie użycie łatwotopliwych stopów materiałów rozszczepialnych (uranu, plutonu) z innymi metalami. Z różnych względów szczególnie

Tablica II. Temperatury robocze a koszt energii elektrycznej (kalkulacja przybliżona)

Temperatura pary (°C)	400°	160°
Ciśnienie pary (at)	34	14
Względny koszt siłowni na 1 kW	1,00	1,18
Względny koszt energii elektrycznej	1,00	1,22

obiecujący wydaje się stop uranu z cyną i ołowiem, względnie z bizmutem. Dlatego te właśnie stopy brane są pod uwagę jako zasadnicze tworzywo innego — projektowanego — energetycznego reaktora jednorodnego dużej mocy.

W każdym razie stos jednorodny stanowi, jak dotąd, jedynę urządzenie pracujące w sposób ciągły. Dzięki dalszym



Rys. 9. Schemat elektrowni atomowej z reaktorem wytwórczym

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1 — rozdzielnia | 5 — zbiornik ciekłego sodu |
| 2 — rdzeń reaktora | 6 — pompa elektromagnetyczna |
| 3 — zbiornik zapasów ciekłego sodu | 7 — kocioł parowy |
| 4 — wymiennik ciepła | 8 — turbogenerator |

licznym zaletom znanym z doświadczenia znaczenie jego dla wytwarzania energii elektrycznej wydaje się więc niewątpliwe.

Reaktor wytwórczy. Jest to reaktor, w którym tworzy się więcej materiału rozszczepialnego (pluton ^{239}Pu z uranu ^{238}U lub izotopu ^{233}U z toru) niż ulega zużyciu (^{235}U lub plutonu). W reaktorze takim paliwo nie ulega zatem zużyciu w przeciwieństwie do wszystkich rozpatrywanych dotychczas reaktorów.

Reaktor wytwórczy składa się z rdzenia i otoczki (rys. 8). Rdzeń zbudowany jest z czystego (lub prawie czystego) metalicznego izotopu ^{235}U lub z plutonu. Otoczka składa się z naturalnego uranu (lub toru). Brak w reaktorze spowalnicza, a więc jest to reaktor na szybkie neutrony. Neutrony, wyzwolane podczas reakcji rozszczepienia w rdzeniu i wydostające się z niego na zewnątrz, są wychwytywane przez jądra ^{238}U (lub toru) otoczki. Prowadzi to do wytwarzania plutonu (^{239}Pu) w szybszym tempie niż zużywany zostaje materiał rdzenia.

Reaktor wytwórczy stanowi bardzo ekonomiczne urządzenie właśnie ze względu na produkcję materiału rozszczepialnego i dlatego z nim wiąże się szczególne nadzieje na przyszłość, jeśli chodzi o problem elektrowni atomowych. Pierwsza próba elektrownia tego typu, o mocy kilkuset kilowatów odznacza się dużą prostotą (rys. 9). Czynnikiem chłodzącym jest stop sodu z potasem. Temperatura robocza wynosi 350°C . Koszt budowy rzędu $1,5 \cdot 10^9$ zł*). Należy jednak pamiętać, że jest to prototyp!

W stadium projektu znajduje się obecnie jednostka średniej wielkości przeznaczona do pracy ciągłej. Przewiduje się

stopniowy wzrost mocy cieplnej od 1,4 do 62,5 MW i jednocześnie odpowiednią produkcję mocy elektrycznej od 0,17 do 15 MW. W toku operacji zwiększy się temperatura i ciśnienie pary do wartości odpowiadających reaktorowi wytwórczemu wielkiej mocy. Również i wyposażenie jednostki, a więc wielkości pomp, wymienników ciepła, zaworów itp. będzie takie, jak w reaktorze wielkiej mocy.

Reaktor-gejzer. Jest to zwykły reaktor grafitowy o chłodzeniu wodnym. Do reaktora wpuszcza się porcję wody chłodzącej. Następnie gwałtownie uruchamia się go wyrzucając szybko sztaby kontrolne. Rozwija się więc lawinowa reakcja łańcuchowa rozszczepienia jąder uranu. Moc reaktora wzrasta zatem nagle o ułamek kilowata do wielu kilowatów. Woda chłodząca gwałtownie zamienia się w parę, która osiąga pewne — z góry określone — ciśnienie. Wtedy otwierają się odpowiednie zawory dławiące i para przechodzi do turbiny, do wnętrza zaś reaktora wpadają sztaby kontrolne zatrzymując go w ciągu ułamka sekundy.

Typ reaktora	Reaktor grafitowy	Reaktor z ciężką wodą	Reaktor ze zwykłą wodą	Reaktor jednorodny	Reaktor wytwórczy
Problem					
Wyzyskanie neutronów	1	2	1	1	3
Obróbka materiałów	1	1	1	3	1
Inwestycja	2	1	2	3	1,2,3
Wytwórczość	1	2	1	2	3
Bezpieczeństwo	2	2	2	2	1
Łatwość konstrukcji	3	3	3	2	3

Rys. 10. Porównanie własności reaktorów różnych typów

- 1 — własności mało korzystne
2 — własności pośrednie
3 — własności korzystne

Teraz do reaktora wlewa się nową porcję wody chłodzącej i opisany cykl przemian powtarza się. Jest on, oczywiście, sterowany automatycznie. Pulsujące ilości pary dochodzą do turbiny sprężonej z prądnica i napędzają ją. Opisane urządzenie stanowi zatem rodzaj jądrowego silnika parowego.

Reaktor-gejzer, dzięki swej prostocie i innym zaletom, okazał się bardzo obiecującą konstrukcją. Dlatego też planowana jest budowa takiej jednostki średniej wielkości (podobnie jak w wypadku reaktora wytwórczego). Projektanci spodziewają się, że droga ta stanowić będzie bardzo taną metodę uzyskania ciepła z reaktora i że wyeliminuje się tu jeden stopień pomiędzy cieczą chłodzącą reaktor a turbinami, para bowiem, wytworzona bezpośrednio w reaktorze, będzie napędzać turbiny. Planuje się reaktor o mocy cieplnej 20 MW i mocy elektrycznej 5 MW.

6. Porównanie różnych typów reaktorów.

Bardzo ciekawe wnioski można wysnuć przy porównaniu własności reaktorów różnych typów (rys. 10).

Reaktor grafitowy jest konstrukcją najstarszą, najbardziej znaną i najlepiej opanowaną. Stanowi on jednocześnie jedyny wypróbowany typ reaktora przemysłowego wielkiej mocy (znane są reaktory o mocy rzędu 1000 MW). Jego wady stanowią: małe wyzyskanie neutronów, trudności obróbki elementów paliwowych (sztab uranowych) oraz mała wytwórczość (plutonu).

Reaktor z ciężką wodą również jest dobrze znany. Wyzyskuje neutrony lepiej niż reaktor grafitowy, stwarza jednak trudności przy obróbce elementów paliwowych i wymaga dużych nakładów (koszt ciężkiej wody).

Reaktor ze zwykłą wodą bardzo źle wyzyskuje neutrony (duże pochłanianie) i wymaga również kłopotliwej obróbki elementów paliwowych. Konstrukcja jego nie nastęrcza jednak specjalnych trudności.

Reaktor jednorodny słabo wyzyskuje neutrony. Odpadają jednak trudności przy obróbce elementów paliwowych (ciężki

*) Koszty budowy reaktorów jądrowych: małe reaktory 0,5 do $2,10^7$ zł, duże reaktory 1,25 — $2,5 \cdot 10^{10}$ zł i więcej.

materiał rozszczepialny) i w związku z tym nakłady finansowe powinny być stosunkowo niewielkie. Również konstrukcja nie sprawia specjalnych trudności, przede wszystkim jednak reaktor odznacza się dobrą wytwórczością. Dlatego typ ten rokuje szczególne nadzieje dla energetyki. Pewną niewiadomą stanowi koszt inwestycji, zwłaszcza jeśli chodzi o większe konstrukcje, nie ogłoszono bowiem dotąd kosztu paliwa ($^{235}_{92}\text{U}$ lub $^{239}_{94}\text{Pu}$).

Bardzo istotną sprawą stanowi bezpieczeństwo konstrukcji. Wiadomo, że reaktor, w którym zdolność pochłaniania neutronów przez płyn chłodzący przeważa nad zdolnością ich spowalniania, kryje w sobie niebezpieczeństwo wybuchu. Dlatego

go reaktory wspomnianej wyżej elektrowni o mocy 40 MW będą chłodzone dwutlenkiem węgla (brak ryzyka), wielkie zaś reaktory grafitowe, chłodzone wodą (silne pochłanianie neutronów), są budowane na odludziu (ryzyko potencjalne). Najkorzystniej przedstawia się chłodzenie ciekłymi metalami. Wydaje się, że po obecnym opanowaniu ich technologii w dość dużych instalacjach zastosuje się je na jak najszerszą skalę.

Reaktory wytwórcze (na szybkie neutrony) nie są zbyt bezpieczne z odmiennych powodów. Tu bryła łatwo rozszczepialnego materiału ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ lub $^{233}_{92}\text{U}$) w rdzeniu reaktorów stanowi potencjalną bombę atomową. Trzeba więc tu stosować bardzo liczne zabezpieczenia.

INŻ. STANISŁAW ANDRZEJEWSKI

Materiały do budowy reaktorów atomowych

546.79:546.212.02:621.384.6/47

Treść. Budowa reaktorów atomowych wymaga zastosowania w najczystszej postaci wielu pierwiastków (uran, tor, pluton i inne), które dotychczas nie miały użytecznego zastosowania, a których wytwarzanie jest bardzo skomplikowane i kosztowne oraz otoczone ścisłą tajemnicą. Również kosztowne jest otrzymywanie ciężkiej wody. Ważność decyzji rządu ZSRR.

Материалы для постройки атомных реакторов. Требуется применение многих элементов в чистейшем виде (уран, торий, плутон и другие), которые донныне не находили полезного применения, а производство которых весьма сложно, обходится дорого и окружено тайной. Также получение тяжелой воды обходится дорого. Важность постановления правительства СССР.

Materials for the construction of atomic reactors. Atomic reactor construction calls for the use of numerous elements (uranium, thorium, plutonium and so forth) in their purest form, that is to say — of such elements as were hitherto of no practical use, and the production of which is most complex, expensive and a closely guarded secret. The obtaining of heavy water is likewise expensive. Importance of the decision taken by the government of the U. S. S. R.

Przy omawianiu konstrukcji reaktorów atomowych spotykamy się z materiałami, które dotąd w technice nie były stosowane, a przynajmniej nie na taką skalę, jak w reaktorach. Uran, pluton, tor, deuter, cyrkon, bar, beryl, hafn i inne pierwiastki znane nam były dotychczas głównie z tablicy Mendelejewa. Obecnie stały się one materiałami stosowanymi w reaktorach w ilościach nieraz setek ton. Nie dość na tym, że pierwiastki te są rzadkie, że wobec ich dotychczasowej nieużyteczności nie opracowano dostatecznie dokładnie technologii ich otrzymywania, ale — aby nadawały się do budowy reaktora, muszą one osiągnąć niezwykłą czystość, niewielkie bowiem zanieczyszczenia zwykłymi domieszkami powodują tak znaczne pochłanianie neutronów, że uniemożliwia to pracę reaktora. Niekiedy przy wyodrębnianiu często spotykanej domieszki okazuje się, że ona także ma zastosowanie w budowie reaktora. Na przykład hafn, towarzysząc zwykłe cyrkonowi, tak silnie pochłania neutrony, że wymagane jest usunięcie z cyrkonu nawet śladów tego pierwiastka. Po wyodrębnieniu go stwierdzono, że jego zdolność pochłaniania neutronów może być wyzyskana do wykonania sztab regulacyjnych.

Materiały do budowy reaktora można podzielić na kilka kategorii, a mianowicie:

- 1) materiał, z którego w reaktorze możemy wytworzyć materiał rozszczepialny, U-238 i tor,
- 2) materiał rozszczepialny uran U 235, uran U 233 oraz pluton Pu 238,
- 3) materiał na puszki ochronne — glin, cyrkon,
- 4) spowalnicze (moderator): grafit, ciężka woda, lekka woda, beryl,
- 5) sztaby kontrolne — kadmi, hafn, bor,
- 6) czynnik chłodzący — woda lekka, woda ciężka, hel, dwutlenek węgla, azot, sól i potas, rtęć.

Otrzymanie niektórych z wymienionych materiałów jest technologicznie niezwykle trudne i kosztowne.

URAN według szacunku amerykańskich uczonych jest dość rozpowszechniony na ziemi, aczkolwiek bogatych rud jest stosunkowo niewiele. Uran znajduje się w niektórych minerałach w ilości tyśiącznych części. Opracowano ostatnio metody opłacalnego wydobycia uranu z rud, które zawierają go nawet poniżej 0,2%. Szczególnie nadają się do wyzyskania te ubogie w uran minerały, które i tak podlegają przeróbce, jak np. minerały, z których wydobywa się złoto w Afryce Południowej. We Francji są obecnie czynione usiłowania opłacalnej przeróbki łupków zawierających poniżej 0,1% uranu.

Otrzymywanie technicznie czystego uranu z rud, oddzielanie pospolitych zanieczyszczeń, jak zwykle spotykane metale, krzemiany itp., odbywa się normalnie stosowanymi metodami

chemicznymi. Trzeba jednak usunąć z uranu domieszki pierwiastków o dużej zdolności pochłaniania neutronów, jak bar, kadmi, ind i niektóre rzadkie ziemie. Zawartość tych pierwiastków w uranie nie może przekraczać 1 mg/kg U, tj. 0,0001%.

TOR. Jest to produkt wyjściowy, z którego w reaktorze atomowym wytwarza się rozszczepialny izotop uranu U 233. Powstałe w torze ilości uranu rozszczepialnego są niewielkie, gdyby zatem tor zawierał zwykle zanieczyszczenie uranem U 238, to rozdzielanie uranu U 233 od izotopu U 238 musiałoby odbywać się drogą żmudnej i kosztownej separacji izotopów. Aby tego uniknąć, należy z toru — przed poddaniem go działaniu neutronów — usunąć nawet ślady uranu tak, aby jego zawartość w torze wynosiła mniej niż 1 mg/kg Th. Po wytworzeniu w reaktorze uranu U 233 można go wydzielić z toru zwykłymi metodami chemicznymi, które są tańsze od separacji izotopów, choć trzeba manipulować materiałami silnie promieniotwórczymi.

URAN U 235. Ten rozszczepialny izotop uranu stanowi 0,72% uranu naturalnego. Wobec jednakowych własności chemicznych wydzielenie jest możliwe jedynie drogą zabiegów fizycznych. Najpowszechniej stosowaną metodą wydzielenia uranu U 235 jest dyfuzja gazowa polegająca na tym, że uran w postaci gazu — sześciofluorku uranu UF_6 — przenika przez porowatą przeponę. Wskutek różnicy ciężaru atomowego lżejszy uran U 235 przenika łatwiej niż cięższy izotop U 238, jednakże stosunek ciężarków cząsteczkowych sześciofluorku uranu U 238 i U 235 jest prawie bliski jedności, a mianowicie wynosi 352:349. Toteż współczynnik rozdzielenia jest także niewielki i dla uzyskania rozdzielania izotopów U 238 i U 235 trzeba było stosować urządzenia kaskadowe, zawierające po kilka tysięcy członów.

Dyfuzja cieplna polega na tym, że sześciofluorek uranu przechodzi pod ciśnieniem pomiędzy dwiema płaszczyznami, z których jedna jest gorąca, a druga zimna. Dzięki różnicy mas obu izotopów i skomplikowanym siłom międzycząsteczkowym następuje rozdział izotopów, a mianowicie izotop cięższy skupia się przy ścianie zimnej, lżejszy — przy gorącej. Współczynnik rozdzielenia jest niewielki, ale dzięki prostocie stosowania tej metody jako pierwszej dla otrzymania wzbogaconego materiału do separacji magnetycznej.

Separacja magnetyczna polega na tym, że jony gazowe izotopów, przebiegające w silnym polu magnetycznym, ulegają różnemu odchyleniu zależnie od różnicy mas. Współczynnik rozdzielenia jest bardzo wysoki, dochodzi do 100%, ale wydajność jest niewielka. Nie opublikowano dotąd pod postacią jakiego związku uran jest tą metodą przerabiany.

Robiono próby z wirówkową metodą oddzielenia izotopów i aczkolwiek stwierdzono, że jest ona możliwa, nie zastosowano jej na większą skalę. Inne metody, jak destylacja czy elektroliza, okazały się nieprzydatne dla ciężkich pierwiastków.

Stosowany w separacji dyfuzyjnej sześćfluorek uranu UF_6 jest niezwykle trujący i bardzo silnie agresywny chemicznie. Toteż wszelkie urządzenia muszą być wykonane z wyjątkową starannością, aby uniknąć korozji i nieszczelności. Wymaga to świetnego opanowania technologii wytwarzania aparatury chemicznej. Dodatkowym niebezpieczeństwem, które istnieje przy manipulowaniu czystym izotopem U 235, jest niewielka masa krytyczna, przy której rozpoczyna się reakcja łańcuchowa. Wymaga to specjalnych ostrożności przy składowaniu i choć małe jest prawdopodobieństwo takiego wybuchu, jak w przypadku bomby atomowej, jednakże wzmógł strumień neutronów wydzielany przy reakcji łańcuchowej może na całe lata zakazić znaczną przestrzeń promieniotwórczością.

Rozdzielanie izotopów uranu pochłania olbrzymie ilości energii i jest niezwykle kosztowne. Przykładem tego są wybudowane ostatnio w Stanach Zjednoczonych kosztem miliarda dolarów zakłady dyfuzyjnej separacji, które będą zużywały 15 mld kWh energii elektrycznej rocznie.

PLUTON jest pierwiastkiem, który w przyrodzie nie występuje. Otrzymuje się go w reaktorze atomowym z uranu U 238 po wchłonięciu przez niego neutronu. Źródłem plutonu są więc sztaby czy osłony z uranu, które przez dłuższy czas poddane były niezwykle silnemu działaniu neutronów i są wskutek tego bardzo radioaktywne. Radioaktywność sztaby uranu wyjętej z reaktora można porównać z promieniowaniem setek kilogramów, a nawet ton radu. Wszelkie manipulacje muszą być dokonywane zdalnie. Uran przez szereg miesięcy leży w wodzie, gdzie wygasa radioaktywność pierwiastków o krótkim czasie półroczu. Zmniejszenie radioaktywności jest bardzo pożądane, ponieważ w warunkach silnej jonizacji wywołanej promieniowaniem korozja jest specjalnie wzmocniona, związki organiczne polimeryzują, a w roztworach wodnych powstaje nadtlenek wodoru.

Następnie uran rozpuszcza się w kwasie, a pluton jest wydzielany metodami chemicznymi. Nie należy zapominać o niezwykle toksyczności tego pierwiastka i to nie tylko chemicznej, ale także ze względu na bardzo intensywne promieniowanie. Wchłonięcie do organizmu przez drogi oddechowe czy przewód pokarmowy pyłków uranu w ilości mikrogramów może być dla organizmu niezwykle groźne. Wszelkie manipulowanie aparaturą, w której przerabia się wyjęty z reaktora uran i wydziela z niego pluton, musi odbywać się zdalnie z poza grubych osłon biologicznych. Tam, gdzie nie można oprzeć się na wskazaniach zdalnych przyrządów pomiarowych, czynności organów zdalnie sterowanych są obserwowane za pomocą stereotelewizji. Wszelkie naprawy aparatury są niezwykle trudne, jeżeli nie niemożliwe, aparatura musi więc działać niezawodnie, przede wszystkim zaś nie może wykazywać nawet śladów nieszczelności. Mimo tych trudności stwierdzono, że jako materiał rozszczepialny pluton jest tańszy niż uran U 235.

URAN U 233. Wydzielenie otrzymanego w reaktorze z toru rozszczepialnego izotopu uranu U 233 odbywa się tymi samymi metodami, co wyodrębnienie czystego uranu z rud. Dodatkową trudnością, taką samą jak przy wydzielaniu plutonu, jest konieczność manipulowania zdalnie silnie promieniotwórczymi produktami. Przy wydzielaniu wytworzonych w reaktorze rozszczepialnych pierwiastków trzeba usunąć wiele bardzo silnie promieniotwórczych produktów rozpadu. Niewielkie ilości gazowych odpadów promieniotwórczych można w dużym rozcieńczeniu powietrzem wyrzucić przez wysokie kominy do górnych warstw atmosfery; płynne odpady mogą być rozcieńczone w strumieniu dostatecznie dużej rzeki, na stałe zaś trzeba znaleźć odpowiednio zabezpieczone miejsce składowania.

CYRKON. Puszkki, względnie osłony, mają chronić uran od korozji wodnej, a wodę chłodzącą od trwałego zarażenia unoszoną z reaktora produktami o bardzo długotrwałym promieniowaniu. Muszą one być wykonane z materiału, który byłby odporny na korozję, nie pochłaniał neutronów i wytrzymywał działanie wysokich temperatur. Z łatwo dostępnych materiałów najlepiej nadawałoby się aluminium. Niestety, ten

materiał nie wytrzymuje wysokich temperatur i wskutek tego nie może być stosowany do reaktorów energetycznych, gdzie zależy nam na jak najwyższych temperaturach. Lepiej nadawałby się do tego cyrkon, jednakże jego produkcja jest bardzo kosztowna. Specjalne trudności powoduje zanieczyszczenie cyrkonu hafnem, który w bardzo silnym stopniu pochłania neutrony.

SPOWALNIACZE. Jako spowalniacze stosuje się grafit, ciężką wodę, lekką wodę, beryl. Beryl jest bardzo silnie trującym pierwiastkiem, którego toksyczność może być porównana z arsenikiem, toteż zastosowanie tego spowalniacza jest bardzo utrudnione. Używany jest w postaci tlenku berylu jako zwierciadło.

Ciężka woda (D_2O) stanowi składnik zwykłej wody w ilości 0,014%; jej własności chemiczne są te same co wody, fizyczne zaś różnią się nieznacznie.

Najstarszym sposobem otrzymywania ciężkiej wody jest elektroliza. Zwykła woda H_2O rozkłada się nieco łatwiej niż ciężka, toteż jeżeli odpowiednio długo prowadzić elektrolizę, to w końcu otrzyma się D_2O . Jednakże będzie to tylko niewielka część i tak już nieznacznej zawartości ciężkiej wody w wodzie. Aby podnieść wydajność tej metody, elektrolizę prowadzi się stopniowo i to tak, że wodor, otrzymany z dalszych stopni i wzbogacony już w deuter, spala się na wodę i doprowadza do poprzednich stopni elektrolizy. Do produkcji ciężkiej wody najlepiej nadaje się roztwór kwasu z akumulatorów, który dzięki elektrolizie zawiera kilkakrotnie więcej deuteru niż zwykła woda.

Drugą metodą otrzymywania ciężkiej wody jest destylacja w kolumnie rektyfikacyjnej o bardzo wielu stopniach. Mimo niewielkiej różnicy temperatur wrzenia, wynoszących tylko $1,4^\circ\text{C}$, daje się uzyskać znośną wydajność.

Trzeci sposób polega na destylacji nie wody, lecz skroplonego wodoru. Ta metoda teoretycznie jest najkorzystniejsza, wymaga jednak pracy w temperaturze -253°C . Pierwsze takie urządzenie na skalę przemysłową buduje się we Francji.

Wreszcie w Stanach Zjednoczonych w czasie wojny opracowano metodę katalitycznej wymiany, opartą na różnicy równowagi pomiędzy wodorem oraz deuterem i ciężką wodą. Elektrolitycznie otrzymamy wodor i woda przepływają w przeciwnym kierunku w wysokich na 30–40 m kolumnach katalitycznych.

Wszystkie wymienione metody otrzymania ciężkiej wody wymagają ogromnych urządzeń i pochłaniają wielkie ilości energii. Cena ciężkiej wody wynosi ok. 200 dol./kg, tj. parokrotnie więcej niż cena uranu. Produkcja ciężkiej wody w Norwegii wynosi 25 t rocznie i jest na szereg lat wyprzedzona, a jeden reaktor wymaga od kilkunastu do paruset ton ciężkiej wody.

Materiały potrzebne do budowy reaktora atomowego są zatem niezwykle kosztowne, a zakup ich jest praktycznie niemożliwy. Tylko w krajach o bardzo wysoko postawionym przemyśle, zwłaszcza chemicznym, udało się uruchomić produkcję wszystkich potrzebnych do zbudowania reaktora materiałów. Wiele procesów technologicznych okryto tak ścisłą tajemnicą, że dotychczas nie ogłoszono na przykład, w jakiej postaci uran poddawany jest separacji magnetycznej, jak są „puszkowane” sztaby uranu itd. Jeżeli nawet pewne szczegóły są opublikowane, to one niewiele mówią o właściwym procesie, który — jak to zwykle bywa w chemii — zależy od tylu parametrów, że bez ich znajomości same formuły zachodzących reakcji nie są przydatne.

Na tle przedstawionego wyżej stanu rzeczy widać wyraźnie doniosłość decyzji rządu Związku Radzieckiego, który umożliwia zbudowanie reaktora atomowego i rozpoczęcie prac badawczych w kraju. Pozwoli to nam zaoszczędzić wiele lat pracy i zmniejszy odległość od tych narodów, które nas w dziedzinie badań nad energią jądrową znacznie wyprzedziły.

LITERATURA

- Roemetsch R. Materialfragen beim Bau von Kernreaktoren (Bull. de l'Assoc. Suisse des Electr., 1954, 26, 1113–1118)
 G o o d m a n C l a r k. Construction of nuclear reactors (The Science and Engineering of Nuclear Power, 1947)
 I r v i n e J. W. Basic Chemistry of the Heavy Elements (The Science and Engineering of Nuclear Power, 1947)

MGR INŻ. ZBIGNIEW NARTOWSKI
Krakowskie Biuro Projektów Sieci Elektrycznych

Urządzenia kompensatorów synchronicznych

621.313.325

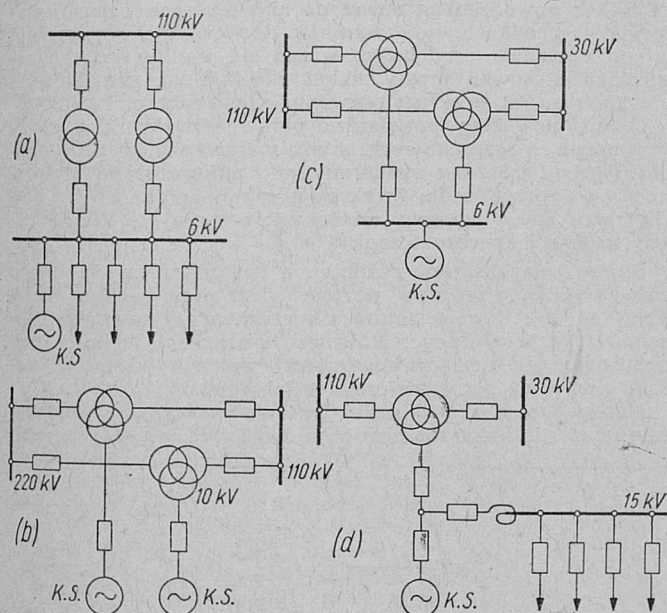
Treść. Schemat połączenia kompensatorów synchronicznych ze stacjami transformatorowymi, rozruch maszyn i jego automatyka oraz regulacja wzbudzenia i zabezpieczenia. Systemy chłodzenia maszyny oraz ustawienie kompensatorów wewnętrzne i napowietrzne. Orientacyjne dane co do kosztów urządzeń kompensatorowych.

Установки синхронных компенсаторов. Схема соединения этих компенсаторов с трансформаторными станциями, пуск машин и его автоматика, регулировка возбуждения и предохранительные устройства. Системы охлаждения машины; внутренние и наружная установка компенсаторов. Ориентировочные данные о стоимости компенсаторных установок.

Synchronous compensator equipment. Diagram of connection of synchronous compensators with transformer stations; the starting of machines and automatics of starting; control of excitation and protective devices. Cooling systems; indoor and outdoor compensator installations. Rough details as to the cost of compensator equipment.

1. Wstęp.

Aktualny obecnie w naszej energetyce problem mocy biernej dotyczy — choć w różnej formie — urządzeń zarówno odbiorców energii elektrycznej i sieci rozdzielczych, jak i sieci przesyłowych. Gdy jednak u odbiorców i w sieciach rozdzielczych najczęściej stosowanym źródłem mocy biernej są kondensatory statyczne, to w sieciach przesyłowych używa się u nas na razie wyłącznie kompensatorów synchronicznych. Przedmiotem niniejszego artykułu jest strona urządzeniowa kompensatorów synchronicznych, pracujących dla sieci przesyłowych *).



Rys. 1. Schematy połączenia kompensatorów synchronicznych ze stacją transformatorową

Przed wojną w kraju pracował jeden tylko kompensator o mocy 10 MVA, obecnie prowadzi się budowę i montaż kilku urządzeń o łącznej mocy przeszło 130 MVA.

Kompensatory instalowane dla sieci przesyłowych są zwykle jednostkami o stosunkowo dużych mocach — 10 do 50 MVA, a niekiedy nawet do 100 MVA. Urządzenia tych kompensatorów na stacjach transformatorowych rozdzielczych mają specjalne rozwiązania, różniące się ze zrozumiałych względów — niejednokrotnie znacznie — od podobnych tematów rozwiązań siłowniowych. Urządzenie kompensatorowe powinny cechować jak największa pewność ruchu, małe straty i prostota w obsłudze i konserwacji. Bardzo ważnym czynnikiem są koszty inwestycyjne oraz łatwość i krótki czas budowy i montażu urządzenia.

2. Schemat połączenia kompensatora ze stacją.

Kompensatory synchroniczne, jak i prądnice synchroniczne, są najczęściej budowane na napięcie znamionowe 6 lub 10 kV. Spotyka się również maszyny o napięciu znamionowym 15 kV, 20 kV i wyżej. Jeżeli na stacji transformacyjno-rozdzielczej, na której ma pracować kompensator, istnieje

lub jest przewidywana rozdzielnia o tym samym napięciu co maszyna, to najprostszym rozwiązaniem jest przyłączenie kompensatora do szyn tej rozdzielni (rys. 1a). Sposób ten jednak może być stosowany tylko przy niewielkich kompensatorach. Dla jednostek dużych przyłączenie kompensatora do szyn zbiorczych rozdzielni nie jest dogodne z tego względu, że kompensatory zwiększają moc zwarciovą rozdzielni. Pociąga to zwykle za sobą konieczność stosowania mocnych i drogich wyłączników, silnych połączeń szynowych oraz dławików. Również z punktu widzenia kompensatora układ ten nie jest korzystny, albowiem zaburzenia w sieci średniowysokiego napięcia, mającej znaczenie tylko lokalne, silnie mogą wpływać na pracę kompensatora, tak ważną dla pracy krajowego układu przesyłowego.

Z powyższego wynika, że dla wielkich kompensatorów korzystna byłaby praca wprost na zaciski transformatora, tzn. z uniknięciem bezpośredniej współpracy z szynami rozdzielni. Tendencję tę realizuje się powszechnie przyłączając kompensatory do trzeciego uzwojenia transformatorów trójzwojennych. Klasyczny przykład tego rodzaju układu bloku kompensator-transformator trójzwojennowy podaje rys. 1b. Schemat ten jest bardzo przejrzysty i pewny, prosty w manipulacji, łatwy do zabezpieczenia i rozwiązania konstrukcyjnego oraz korzystny pod względem warunków zwarciovych. Brak bezpośredniej współpracy ze szynami rozdzielni pozwala regulować wzbudzenie kompensatora według potrzeb regulacji napięcia w układzie przesyłowym, co byłoby utrudnione lub zgoła niemożliwe przy bezpośredniej współpracy z odbiorami lokalnymi.

Praca równoległa dwóch jednakowych transformatorów trójzwojennych w układzie podanym na rys. 1b przy włączeniu tylko jednego kompensatora jest możliwa, jednakże wskutek niesymetrii obciążeń łączne dopuszczalne obciążenie transformatorów musi ulec obniżeniu do wartości rzędu 80—90% sumy pełnych mocy. Jednak ograniczenie to praktycznie nie jest istotne, ponieważ z reguły pozostawia się w transformatorach rezerwę mocy, umożliwiającą w razie uszkodzenia jednego transformatora pokrycie przez drugi transformator poważnej części obciążenia stacji.

Stosuje się również układy z połączeniem transformatorów i kompensatorów na napięciu maszynowym, jak pokazuje np. schemat na rys. 1c. Schemat ten umożliwia pracę kompensatora na oba transformatory, względnie na dowolną z obu jednostek. Po szczegółowej analizie może się też okazać, że możliwe jest przyłączenie do kompensatora rozdzielni lokalnej przez dławik (rys. 1d). Wtedy moc zwarciovą na szynach rozdzielni nie będzie zbyt wysoka, jednakże układ ten ma dalsze wady podane wyżej przy omawianiu schematu z rys. 1a, a zatem nie może być zalecany.

W dalszych rozwiązaniach — przy omawianiu przestrzennego i konstrukcyjnego rozwiązania urządzenia kompensatora — będziemy mieć na uwadze układ blokowy jako najbardziej dogodny i najczęściej stosowany.

3. Rozruch i jego automatyka.

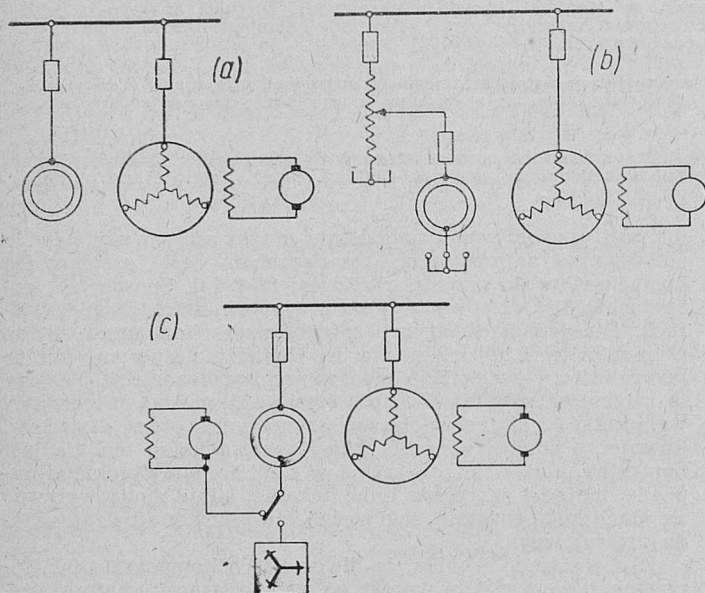
Kompensatory synchroniczne buduje się zwykle na rozruch przy pomocy własnego momentu asynchronicznego lub przy pomocy silnika rozruchowego. W tym drugim przypadku silnikiem rozruchowym bywa silnik asynchroniczny lub pierścieniowy (rys. 2a i 2b) względnie asynchroniczny synchronizowany (rys. 2c). Silnik ten zasilany jest wprost przez autotransformator lub transformator z szyn, na które pracuje kompensator.

Spotyka się również zasilanie silnika rozruchowego z szyn zbiorczych innej rozdzielni. Jest to korzystne w pewnych szczególnych wypadkach, jak np. dla „najeżdżania” urządzeń wysokiego napięcia napięciem podnoszonym od zera do pełnej

* Teorię kompensatorów autor omówił w artykule pt. „Praca kompensatora synchronicznego przy niedowzbudzeniu” (Energetyka 1953, nr 3).

wartości, a dostarczany przez kompensator napędzany. Silnik doprowadza zespół kompensatorowy do prędkości bliskiej prędkości synchronicznej. Następnie przeprowadza się synchronizację i włącza kompensator na sieć.

Do synchronizacji często stosuje się automatyczne urządzenia synchronizacyjne. W ZSRR zaleca się i szeroko stosuje

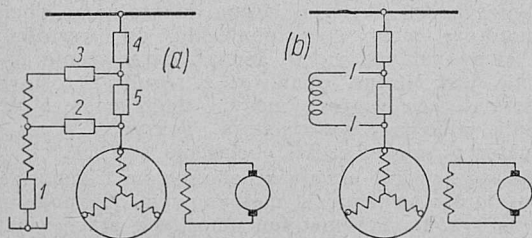


Rys. 2. Układy połączeń silnika rozruchowego

- (a) — silnik rozruchowy asynchroniczny zwarty
(b) — silnik rozruchowy asynchroniczny pierścieniowy, zasilany przez autotransformator
(c) — silnik rozruchowy asynchroniczny synchronizowany

zamiast synchronizacji ścisłej dla kompensatorów samosynchronizację. Własny moment asynchroniczny kompensatora synchronicznego pochodzi od uzwojeń tłumiących, względnie pełnych biegunów wirnika. Dla zmniejszenia prądu rozruchowego włącza się maszynę do sieci przez autotransformator lub dławik.

Często stosowany układ autotransformatorowy, tzw. układ Korndorfera, przedstawia rys. 3a. Wyłączniki 1, 2 i 3 są przed rozpoczęciem rozruchu zamknięte, wyłączniki 4 i 5 otwarte.



Rys. 3. Układy połączeń dla rozruchu przy pomocy własnego momentu asynchronicznego

- (a) — z autotransformatorem w układzie Korndorfera
(b) — dławikiem rozruchowym

Rozruch zaczynamy zamykając wyłącznik 4. Maszyna zasilana jest przez autotransformator. Następnie otwieramy wyłącznik 1 i w ten sposób rozwieramy punkt zerowy autotransformatora, wskutek czego jego uzwojenia działają jak dławik. Wreszcie zwieramy autotransformator załączając wyłącznik 5 i odłączamy autotransformator przez otwarcie wyłączników 2 i 3.

Prostszy jest układ z dławikiem rozruchowym, przedstawiony na rys. 3b. Wymaga on tylko dwóch wyłączników. Jako dławik rozruchowy stosuje się dławik przeciwzwarciowy suchy, używany normalnie w rozdzielniach.

Stosowane są również układy rozruchowe, będące rozwiązaniem pośrednim, a polegające na stosowaniu silnika rozruchowego i własnego momentu asynchronicznego maszyny równocześnie. Można nazwać ten sposób rozruchem mieszanym. Dwa przykłady takiego rozruchu podaje rys. 4. Przebieg rozruchu w układzie przedstawionym na rys. 4a jest następujący: wyłącznik 4 jest otwarty, wyłącznik 2 zamknięty;

załączamy wyłącznik 1 i wtedy silnik rozruchowy rozpoczyna rozruch; następnie otwieramy wyłącznik 2 — maszyna synchroniczna zostaje załączona pod napięcie poprzez uzwojenia silnika; po osiągnięciu prędkości bliskiej synchronicznej załączamy wyłącznik 4, kompensator zostaje wciągnięty w synchronizm, otwieramy wyłącznik 1 i 3. Prostszy jest układ podany na rys. 4b. Maszynę włączamy pod napięcie wyłącznikiem 1 przy otwartym wyłączniku 2. Rozruch wykonujemy przy pomocy pierścieniowego silnika rozruchowego, wspomaganego przez moment asynchroniczny maszyny. Po osiągnięciu prędkości podsynchronicznej zwieramy punkt zerowy maszyny synchronicznej zamykając wyłącznik 2. Kompensator osiąga synchronizm.

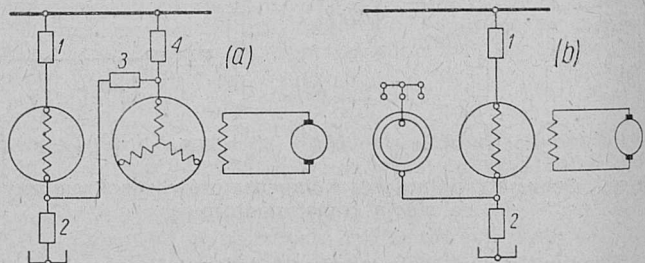
Wybór sposobu rozruchu w zasadzie należy do konstruktora maszyny. Winien on otrzymać dane co do warunków sieciowych, określające dopuszczalny prąd rozruchu kompensatora. Prąd ten ustala się na podstawie dopuszczalnego obniżenia napięcia na szynach stacji — zwykle 80–90% napięcia znamionowego. Ponieważ sposób rozruchu wpływa na koszt kompensatora i jego wyposażenie, straty, warunki eksploatacji i sposób ustawienia wybór konstruktora winien być przeanalizowany również przez projektanta urządzenia kompensatorowego.

Doświadczenia techniki radzieckiej wskazują, że najkorzystniejszym sposobem rozruchu kompensatora jest rozruch przy pomocy własnego momentu asynchronicznego z dławikiem. Jest to układ najprostszy i wymagający najmniej aparatury, a zatem najpewniejszy i najtańszy. Jest on stosowany w ZSRR z powodzeniem nawet do największych kompensatorów. W wypadkach, gdy warunki sieciowe nie dopuszczają dużego uderzenia prądowego, winno się według zaleceń radzieckich stosować prosty układ z silnikiem rozruchowym (ob. np. rys. 2a) przy zastosowaniu samosynchronizacji.

Opinie powyższą potwierdza porównanie kosztów głównych urządzeń rozruchowych: silnik rozruchowy kosztuje około 10% ceny maszyny synchronicznej, autotransformator rozruchowy w przybliżeniu dwukrotnie mniej (około 5%), a dławik rozruchowy przeszło czterokrotnie mniej tj. około 2% ceny maszyny synchronicznej.

Straty kompensatora z silnikiem rozruchowym są nieco większe (kilka procentów wartości strat przy pełnym obciążeniu) od strat kompensatora z rozruchem od własnego momentu asynchronicznego. Również konserwacja silnika rozruchowego, jako maszyny wirującej wymaga większego nakładu pracy niż autotransformator lub dławik.

Należy wreszcie podkreślić, że hala maszyn dla kompensatorów z silnikiem rozruchowym musi być większa od hali



Rys. 4. Układy połączeń dla rozruchu mieszanego

dla kompensatorów z dławikiem rozruchowym lub autotransformatorem rozruchowym (powiększenie kubatury rzędu 10%) oraz fundament kompensatora z silnikiem rozruchowym jest większy i bardziej skomplikowany.

Rozważając rozruch kompensatorów należy wspomnieć o rozruchu starych prądnic synchronicznych przystosowanych do pracy kompensatorowej. Stanowi to najtrudniejsze zagadnienie przystosowania. W większych siłowniach często przewiduje się rozruch częstotliwościowy, tj. przy zasilaniu prądem o częstotliwości wzrastającej od zera, a pochodzącym od wydzielonego ze współpracy z siecią turbozespołu.

Rozruch maszyny synchronicznej od strony turbiny, tj. parą, ma tę wadę, że dla chłodzenia turbiny konieczne jest zasilanie parą turbiny w czasie pracy kompensatora.

Rozruch przy pomocy wzbudnicy, pracującej jako silnik zasilany przez sieć prądu stałego, da się realizować tylko przy całkiem małych maszynach, tam bowiem moc wzbudnicy jest stosunkowo duża: już dla maszyn rzędu 1 MVA wynosi około 1% mocy maszyny, dla dużych zaś jednostek jest znacznie mniejsza, np. dla maszyny o mocy 50 MVA wynosi około

0,3%. Natomiast silniki rozruchowe mają na pokrycie strat i nadanie przyspieszania masie wirującej moc równą 5—7% mocy maszyny, a zatem moc normalnej wzbudnicy nawet dla małej maszyny (1 MVA) jest dla rozruchu za mała.

Bardzo interesujące są badania radzieckie, według których można stosować dla maszyn synchronicznych z wirnikami turbinyowymi rozruch asynchroniczny przy obniżonym napięciu. Rozruch kompensatora trwa od kilku do kilkudziesięciu sekund, wyjątkowo kilka minut. Urządzenia rozruchowe są liczone termicznie na krótkotrwałe obciążenie w czasie dwóch lub trzech bezpośrednio po sobie następujących rozruchów. W niektórych kompensatorach stosuje się przed rozruchem wtłaczanie oleju do łożysk maszyny pod ciśnieniem kilku-kilku atmosfer. W ten sposób uzyskuje się warstwę oleju między łożyskiem i wałem, dzięki której tarcie w łożysku w chwili rozruchu zmniejsza się wielokrotnie.

Obsługę kompensatora w czasie rozruchu upraszcza bardzo znacznie automatyka. Odpada wtedy duża ilość koniecznych do wykonania manipulacji obsługi oraz zwiększa się pewność wykonania wszystkich czynności i we właściwej kolejności.

Stosuje się również półautomatykę polegającą na tym, że główne czynności łączeniowe wykonuje się ręcznie, a pozostałe przebiegają samoczynnie. Automatyka rozruchu kompensatorów synchronicznych obejmuje samoczynne sterowanie obwodów: a) prądu zmiennego wysokiego napięcia dla przyłączenia maszyny synchronicznej i ewentualnego silnika rozruchowego, b) prądu stałego wzbudzenia kompensatora oraz c) prądu zmiennego niskiego napięcia dla urządzeń pomocniczych.

Pewność działania automatyki i prostota jej obsługi jest tym większa, im mniejsza jest ilość elementów automatyki — przełączników. Ilość ta zależy przede wszystkim od sposobu rozruchu kompensatora, toteż z punktu widzenia automatyki najkorzystniejszy jest rozruch asynchroniczny z dławikiem. Właściwe następstwo czynności przy rozruchu automatycznym uzyskuje się bądź drogą kontroli zmiany wartości pewnych parametrów, które charakteryzują stan pracy maszyny (np. liczba obrotów, składowa zmiana prądu wirnika), bądź drogą zastosowania przełączników czasowych, które po odpowiednim czasie, zapewniającym zakończenie poprzednich operacji, powodują następną z kolei czynność rozruchu.

Sterowanie obwodu wzbudzenia kompensatora polega przede wszystkim na połączeniu uzwojeń wzbudzenia kompensatora ze wzbudnicą. Niektóre wytwórnie, między innymi i radzieckie, stosują w swych starych rozwiązaniach — ze względu na ujemny moment pochodzący od uzwojenia wzbudzającego, a występujący na początku rozruchu — włączanie wzbudnicy na wirnik dopiero po osiągnięciu obrotów podsynchronicznych, co komplikuje układ automatyki. W nowych rozwiązaniach radzieckich stosuje się włączanie wzbudnicy na uzwojenie wirnika od razu. Dzięki temu, przy tej samej wartości eksploatacyjnej osiągnięto uproszczenie automatyki a w dalszej konsekwencji zwiększono pewność jej działania.

4. Wzbudzenie i jego regulacja.

Wzbudzenie kompensatorów synchronicznych wykonywane jest według tych samych zasad, które obowiązują dla generatorów. Najczęściej stosuje się wzbudnicę osadzoną na wale maszyny, niekiedy wzbudnica jest napędzana osobnym silnikiem i tworzy osobno ustawiony zespół, czasem rolę wzbudnicy spełnia prostownikowy układ elektronowy. Wzbudnica — ze względu na szeroki zakres regulacji — ma zwykle jeszcze wzbudnicę pomocniczą. Moc wzbudnicy dobiera się przy uwzględnieniu stosowanego z reguły forsowania wzbudzenia.

Zadanie regulacji napięcia kompensatora może być postawione różnorodnie. Regulacja wzbudzenia może służyć do utrzymania stałego napięcia w pewnym punkcie stacji, np. na szynach rozdzielni 110- lub 220-kilowoltowej, względnie na szynach, do których przyłączony jest kompensator. Innym zadaniem może być regulacja stałego współczynnika mocy w linii przesyłowej (np. utrzymywanie $\cos \varphi = 1,0$) albo utrzymywanie stałej wartości natężenia prądu maszyny, co daje przy pewnym napięciu stałą — określoną programem dobowym — wartość dostarczanej mocy biernej.

Zakres regulacji wzbudzenia kompensatora powinien być tak dobrany, aby możliwa była swobodna zmiana prądu wzbudzenia od wartości odpowiadającej mocy znamionowej przy obciążeniu indukcyjnym (przewzbudzenie) aż do wartości prądu wzbudzenia równej zeru. Niekiedy dla pełnego wyzyska-

nia maszyny przy obciążeniu pojemnościowym (niedowzbudzenie) stosuje się również wzbudzenie ujemne.

Regulatory wzbudzenia kompensatorów są takie same jak dla prądnic, tzn. stosuje się regulatory mechaniczne oporowe, regulatory z wzmacniaczami magnetycznymi lub maszynowymi oraz regulatory elektronowe, przy czym stosuje się zwykle urządzenie ograniczające prąd wzbudzenia dla zapobieżenia przeciążeniom maszyny przy przewzbudzeniu lub dla zapewnienia równowagi pracy przy niedowzbudzeniu albo wzbudzeniu ujemnym. Ograniczenie prądu wzbudzenia mające na celu ochronę maszyny przed przeciążeniem winno dopuszczać krótkotrwałe przekroczenie mocy znamionowej maszyny.

Sposób i parametry regulacji zależą od wymagań sieci i muszą być sprecyzowane jako założenie do projektu kompensatora.

5. Zabezpieczenie kompensatorów.

Ochronę przekątnikową kompensatorów synchronicznych wykonuje się podobnie jak ochronę odpowiedniej mocy prądnic, pracujących w tym samym układzie połączeń z siecią. Zabezpieczenia od uszkodzeń wewnętrznych niczym nie różnią się od zabezpieczeń generatorowych. Nieco inaczej natomiast rozwiązuje się zabezpieczenia od nienormalnej pracy maszyny, np. dla kompensatorów synchronicznych stosuje się ochronę podnapięciową, działającą przy długotrwałym (rzędu co najmniej kilkunastu sekund) poważnym obniżeniu napięcia (poniżej 40% U_N) na odwzbudzenie i ewentualnie wyłączenie kompensatora.

6. Chłodzenie kompensatorów.

Straty kompensatorów synchronicznych wynoszą ok. 2% mocy biernej maszyny, tj. dla jednostek od 5 do 50 MVA około 100 do 1000 kW. Jest to bardzo poważna ilość ciepła. Nieznaczna część tego ciepła można wyzyskać w okresie zimowym do ogrzewania hali maszyn i budynku stacyjnego, resztę trzeba odprowadzić na zewnątrz przy pomocy instalacji chłodzącej. Stosowane są następujące systemy chłodzenia kompensatorów: powietrzne w obiegu otwartym lub zamkniętym oraz wodorowe.

Przy chłodzeniu powietrznym w obiegu otwartym powietrze z zewnątrz zasysane jest przez filtry i kanałami doprowadzane do maszyny. Przepływ powietrza wymuszony jest przez wentylatory umieszczone na wale maszyny. Ogrzane powietrze (o temperaturze ok. 60°C) odprowadza się do kominą wylotowego. Zaletą takiego sposobu chłodzenia jest prostota urządzeń oraz ich niewielki stosunkowo koszt. Wadą natomiast jest zanieczyszczanie maszyny, mimo bowiem stosowania filtrów powietrze chłodzące unosi ze sobą kurz i pył, który osadza się wewnątrz maszyny i utrudnia jej chłodzenie. W rezultacie prowadzi to do przyspieszenia starzenia się izolacji, a zatem skrócenia okresu służby maszyny. Dla ilustracji można przytoczyć, że przy praktycznie czystym powietrzu o zawartości pyłu 0,1 mg/m³ i przy przeciętnie spotykanej objętości powietrza chłodzącego 1000 m³/h otrzymamy około 30 kg pyłu osadzającego się w maszynie w ciągu jednego roku.

Dużo uwagi należy poświęcić dogodnemu prowadzeniu i starannemu wykończeniu kanałów powietrznych, aby używać jak najmniejsze opory przepływu powietrza i w ten sposób otrzymać jak najmniejsze straty kompensatora. Należy jeszcze wspomnieć o tym, że obieg otwarty jest niekorzystny z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego maszyny, w razie bowiem pożaru stale dopływające świeże powietrze sprzyja rozwijaniu się ognia.

Chłodzenie powietrzne w obiegu zamkniętym polega na tym, że powietrze ogrzane przechodzi przez chłodnicę wodną, gdzie oddaje wodzie swe ciepło i już jako zimne wraca do maszyny. Odpada wobec tego zanieczyszczenie wnętrza maszyny pyłem, jak również sposób ten nie sprzyja rozwijaniu się pożaru maszyny ze względu na brak tlenu w zużytym w razie pożaru powietrzu. Poza tym chłodzenie w obiegu zamkniętym stwarza lepsze warunki pracy ze względu na niewielkie wahanie temperatury powietrza chłodzącego.

Zalety powyższe są okupione znacznym skomplikowaniem urządzenia, dochodzi bowiem cały obieg wodny i chłodnia, chłodnica kominowa ze zbiornikiem wody, pompa obiegowa oraz źródło zasilania instalacji wodą uzupełniającą. Chłodnica mieści się pod maszyną synchroniczną wewnątrz fundamentu maszyny lub obok maszyny, na tym samym poziomie co sama maszyna.

Zużycie wody jest rzędu 2—4 m³/MVA.h, co przy mocy 25 MVA daje dość poważną ilość 50 m³/h. Temperatura wody chłodzącej nie powinna przekraczać 28°C. Woda musi być wolna od domieszek mechanicznych oraz o niewielkiej twardości przemijającej, aby nie dopuścić do osadu na rurach chłodnic. Do chłodzenia wody obiegowej stosuje się baseny rozbryzgowe i chłodnie kominowe. Korzystniejsze są chłodnie kominowe, gdyż zajmują mniej miejsca oraz można je (ze względu na zraszanie) ustawiać bliżej budynku i urządzeń stacyjnych aniżeli baseny (pożądana odległość od chłodni wynosi 30—35 m, natomiast przy basenie co najmniej 100 m). Orientacyjne wymiary chłodni kominowej dla dwóch kompensatorów po 35 MVA: rzut ośmioboczny o przekątnej 15 m, wysokość 23 m. Straty wody (odparowanie, rozbryzg) wynoszą dla basenów 5—7%, dla chłodni kominowych zaś około 1%.

Przy chłodzeniu wodorowym układ instalacji jest w zasadzie podobny do powietrznego zamkniętego. Obieg wody jest identyczny, natomiast obieg wodorowy wyposażony jest w szereg specjalnych urządzeń zapewniających właściwe ciśnienie gazu i jego czystość. Zastosowanie wodoru zmniejsza straty wentylacyjne maszyny oraz pozwala — dzięki lepszymu odprowadzaniu ciepła przez wodór — zwiększyć moc maszyny. Kompensatory synchroniczne szczególnie nadają się do chłodzenia wodorowego, gdyż nie ma tu kłopotliwego w turbogeneratorach uszczelniania wału. Kompensatory z chłodzeniem wodorowym budowane są w kształcie zamkniętej szczelnie cysterny, w której wnętrzu mieści się maszyna. Taka konstrukcja sprzyja napowietrznemu ustawieniu maszyny. Chłodnice przy zastosowaniu wodoru są znacznie mniejsze i mieszczą się w obudowie maszyny.

Kompensator chłodzony wodorem jest według danych rażdzieńskich droższy o ~ 40% od kompensatora chłodzonego powietrzem, wybór więc jednego ze środków chłodzenia winien być poparty kalkulacją gospodarczą. Za granicą uważa się, że kompensatory synchroniczne powyżej 10 MVA opłaca się budować z chłodzeniem wodorowym.

Wybór sposobu chłodzenia kompensatora wymaga dokładnej analizy warunków lokalnych, miejsca ustawienia oraz ofert dostawcy. Urządzenie kompensatorowe z chłodzeniem powietrznym w obiegu zamkniętym jest o ~ 10% droższe od urządzenia z chłodzeniem powietrznym z obiegiem otwartym. Mimo to obieg zamknięty jest właściwy tam, gdzie powietrze jest mocno zanieczyszczone mechanicznie lub chemicznie.

Koszt instalacji wodnej bardzo poważnie zmniejsza się, jeżeli odpada konieczność budowy wieży chłodniczej, tj. tam, gdzie jest do dyspozycji w odpowiedniej ilości woda chłodząca dobrej jakości. Przy zastosowaniu obiegu zamkniętego może się okazać że bardziej celowe jest zastosowanie chłodzenia wodorowego, aniżeli powietrznego.

W wypadku trudności z uzyskaniem wody chłodzącej słuszne jest stosowanie chłodzenia powietrznego w obiegu otwartym jako tańszego i prostego w obsłudze.

7. Ustawienie kompensatorów w hali.

B u d y n e k h a l i k o m p e n s a t o r ó w. Klasyycznym sposobem instalowania kompensatora jest ustawienie go w budynku, w hali. Hala kompensatorowa bywa bardzo często łączona z halą montażową transformatorów. Pozwala to na użytkowanie suwnicy do montażu zarówno transformatorów, jak i kompensatorów, pociągają jednak za sobą poważne zwiększenie niebezpieczeństwa pożaru maszynowni (w podobnych warunkach nastąpił znany pożar siłowni wodnej w Szwajcarii).

Niewątpliwie bardzo korzystne jest bezpośrednie połączenie hali kompensatorów z budynkiem nastawni, ułatwia to bowiem obsłudze nastawni doglądanie samoczynnej zwykle instalacji kompensatorowej i zmniejsza długość kabli nastawianych od kompensatora. Jeżeli bezpośrednie połączenie obu budynków jest utrudnione lub nie da się zrealizować, pożądaną jest, żeby odległość między obu budynkami była jak najmniejsza.

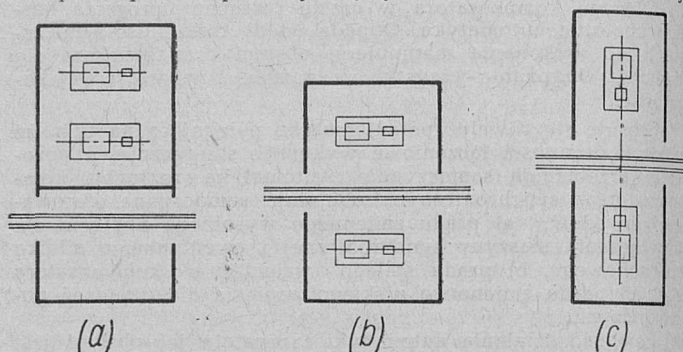
Rys. 5 podaje kilka schematycznie przedstawionych układów hali kompensatorowej dla najczęściej stosowanego zespołu złożonego z dwóch maszyn. Układ (a) stanowi wymiennie wyżej połączenie hali montażowej dla transformatorów z halą kompensatorów. Hala montażowa służy do montażu transformatorów i składania ciężkich części kompensatorów. Przy określaniu powierzchni hali należy brać pod uwagę każdą z tych dwóch możliwości. Wysokość hali najczęściej jest podyktowana potrzebami montażu transformatorów.

Dwa następne szkice — (b) i (c) — przedstawiają halę kompensatorów nie przeznaczoną do montażu transformato-

rów. Dzięki temu hala może być niższa, udźwig suwnicy mniejszy. Dalsze zmniejszenie wysokości hali uzyskujemy przez rozmieszczenie kompensatorów po obu stronach bocznic kolejowej, dzięki czemu odpada konieczność przenoszenia części jednej maszyny nad drugą maszyną. Układ (c) pozwala na zastosowanie suwnicy o mniejszej rozpiętości mostu.

Gabaryt hali jest zwykle podyktowany w rzucie wymiarami fundamentów maszyn i hali, wysokościowo natomiast urządzeniami dźwigowymi i technologią montażu. Kubatura hali według układu z rys. 5(a) wynosi około 10 000 m³. Przykładowe wymiary są podane dalej.

Najczęściej spotykana konstrukcja kompensatora wymaga dwóch poziomów w hali: dolnego — do wyprowadzenia kanałów chłodzących lub ustawienia pomp wodnych i doprowadzenia rurociągów wodnych oraz górnego — do montażu, doglądania i konserwacji maszyny. Dolny poziom hali jest zwykle sytuowany mniej więcej na równi z terenem stacji,



Rys. 5. Układy hali kompensatorów

górny zaś przewiduje się mniej więcej 4 m powyżej poziomu dolnego.

Podest stanowiący strop między dolnym i górnym poziomem wykonuje się jako płytę żelbetową wspartą na niezależnie fundowanych słupkach lub jako ruszt stalowy wsparty na fundamencie maszyny i ścianach hali. Podest normalnie jest obliczany na dopuszczalne obciążenie 1,5—2,0 t/m². W wypadku układania na nim ciężkich części konieczne jest podkładanie np. belek, które rozkładałyby ciężar na większą powierzchnię.

Halę kompensatorową wykonuje się najczęściej jako konstrukcję żelbetową. Należy wspomnieć o szczegółach: ściany hali do wysokości 1,5 m powyżej podłogi powinny być na każdej kondygnacji pomalowane farbą olejną lub wyłożone płytkami ceramicznymi; należy pamiętać o dobrej wentylacji hali, jej ogrzewaniu oraz oświetleniu dziennym i sztucznym.

F u n d a m e n t y p o d k o m p e n s a t o r ó w wykonuje się żelbetowe — ramowe, skrzynkowe lub blokowe. Fundamenty ramowe składają się z płyty fundamentowej, słupów i rygli, na których ustawiona jest maszyna; przy fundamentach skrzynkowych na płycie stawia się ściany skrzyni fundamentu, a na nich maszynę; fundament blokowy tworzy jedną prostą bryłę. Typ fundamentu zależy przede wszystkim od jego kształtów wynikających z konstrukcji maszyny.

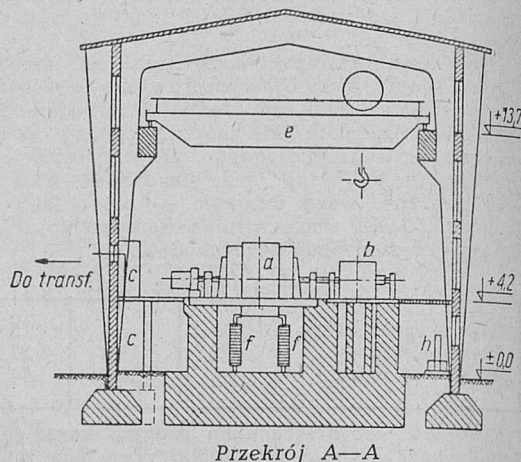
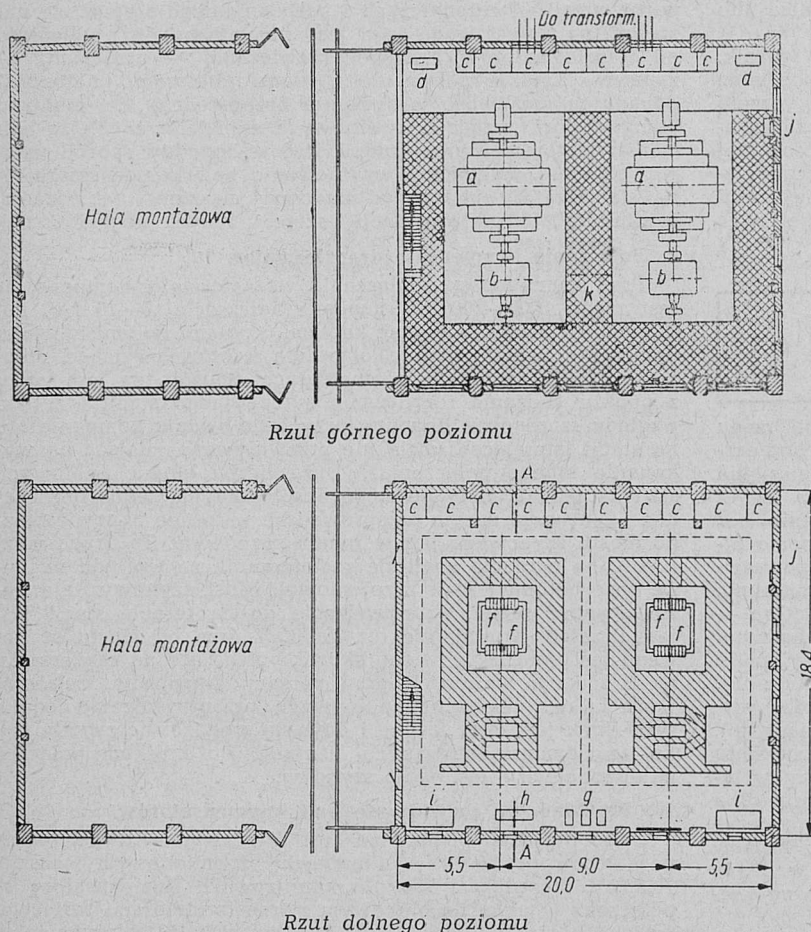
Duże kanały powietrzne biegnące pod maszyną, jak również duże komory dla chłodnic wodnych, mieszczące się u dołu, narzucają konstrukcję ramową lub skrzynkową. Ze względu na niedużą w stosunku do generatorów wysokość fundamentu bardziej celowe jest stosowanie dla kompensatorów fundamentów skrzynkowych. Ilość cementu w fundamentach skrzynkowych jest stosunkowo nieco większa aniżeli w fundamentach ramowych, ale za to mniejsze jest zużycie stali zbrojeniowej. Dalszą zaletą fundamentów skrzynkowych jest ich prostsze wykonanie. Jest to zaleta dość ważna, bo zapewnienie wysokiej jakości skomplikowanego fundamentu na małym — z punktu widzenia budownictwa — obiekcie, jakim jest stacja, sprawia duże trudności. Orientacyjnie można podać, że do wykonania jednego fundamentu kompensatora o mocy ~ 30 MVA trzeba 500 m³ betonu i 75 t stali zbrojeniowej.

Oczywiście, na koszt fundamentu, jego wymiary i sposób rozwiązania wpływa w sposób decydujący wytrzymałość gruntu, który należy więc zbadać przed przystąpieniem do projektowania urządzenia kompensatorowego.

U r z ą d z e n i a d Ź w i g o w e. Maszyna synchroniczna, silnik rozruchowy, wzbudnica i pełne wyposażenie

Hala jest konstrukcji żelbetowej, pomost wzdłuż rozdzielni wysokiego napięcia żelbetowy, a poza tym stalowy w formie rusztu. Fundament maszyny typu ścianowego.

z obiegiem zamkniętym chłodnicy umieszcza się w obudowie z obu boków maszyny (chłodnice tworzą pewnego rodzaju przybudówkę). Przy obiegu otwartym powietrza chłodzącego



Rys. 7. Szkic ustawienia kompensatorów o mocy 35 MVA w hali

OZNACZENIA

- a — maszyna synchroniczna
- b — silnik rozruchowy
- c — pola rozdzielni maszynowej
- d — regulator wzbudzenia
- e — suwnica
- f — chłodnica
- g — pompy wodne
- h — bateria CO_2
- i — pompy olejowe
- j — zejście
- k — otwór montażowy

Połączenie transformatorów z kompensatorami wykonano w formie napowietrznego mostu szynowego. Do gaszenia pożaru wewnątrz maszyny zainstalowano urządzenie gaszące dwutlenkiem węgla, magazynowanym w butlach stalowych.

Stałej obsługi w hali kompensatorowej nie przewidziano, sterowanie ma odbywać się z nastawni stacyjnej, na której przewidziano również sygnalizację wszelkich nienormalnych stanów pracy maszyny i zakłóceń ruchu.

11. Napowietrzne urządzenia kompensatorów synchronicznych.

Najnowsze instalacje kompensatorowe buduje się często pod gołym niebem. W Związku Radzieckim stosuje się urządzenia napowietrzne nawet w okolicach o ciężkich warunkach atmosferycznych, jak np. kompensator o mocy 75 MVA na linii 400-kilowoltowej Kujbyszew — Moskwa.

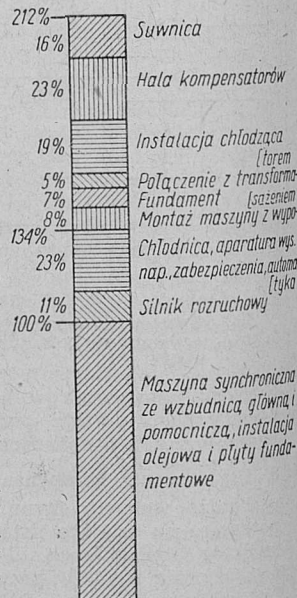
Kompensatory napowietrzne stawia się w bezpośrednim sąsiedztwie transformatorów, dzięki czemu połączenia są bardzo krótkie, rozplanowanie stacji jest znacznie prostsze i łatwiejsze. Kompensatory przeznaczone do ustawienia napowietrznego mają obudowę szczelną, zabezpieczającą maszynę przed wilgocią atmosferyczną. Chłodzenie stosuje się niekiedy powietrzne — otwarte lub w obiegu zamkniętym, najczęściej jednak wodnorowe. W ten sposób obudowa chroniąca maszynę z zewnątrz stanowi równocześnie szczelną okapturzenie, zabezpieczające kompensator przed zanieczyszczeniem atmosfery wodnorowej. Do tego typu kompensatorów zwykle nie stosuje się rozruchu przy pomocy silnika, a przewiduje się raczej dławik rozruchowy lub autotransformator. Wzbudnica najczęściej jest napędzana osobnym silnikiem, czasem przewiduje się wzbudnicę elektronową. Dla umieszczenia wzbudnicy, regulatora, urządzeń wodnorowych, pomp olejowych, wyłączników, aparatury rozruchowej itp. buduje się przy kompensatorze budynek, niekiedy nawet podpiwniczony. Fundament kompensatora jest zwykle bardzo prosty — typu blokowego. Łatwo to uzyskać przy chłodzeniu wodnorowym, albowiem nieduże stosunkowo chłodnice umieszcza się w obudowie maszyny. Przy chłodzeniu powietrznym

kanały powietrzne ssące wykonuje się płytko tuż pod maszyną, a wylot z maszyny wprost na zewnątrz.

Maszynę montuje się na zewnątrz wprost na fundamencie albo w hali montażowej. W pierwszym przypadku fundament ma odpowiednią powierzchnię montażową i często wyposażony jest w proste przenośne urządzenia dźwigowe jak np. portal z wciągarką. W drugim przypadku cały montaż kompensatora przeprowadza się w hali transformatorowej (wykorzystując zainstalowane tam urządzenia dźwigowe), a następnie przetacza się kompensator na własnych kółkach po torze kolejowym na stanowisko na rozdzielni napowietrznej.

Kompensatory przeznaczone do pracy na zewnątrz są ze względu na ich specjalne wykonanie o ~ 20% droższe od kompensatorów normalnych przeznaczonych do ustawienia wnętrznego. Mimo większej ceny maszyny koszt całego urządzenia jest mniejszy aniżeli przy ustawieniu wnętrznym, odpadają bowiem kosztowny budynek hali maszyn oraz suwnica, tańsze są znacznie fundamenty maszyny i połączenia z transformatorami.

Rozwiązaniem pośrednim pomiędzy klasycznym kompensatorem przeznaczonym do ustawienia wnętrznego a napowietrznym jest konstrukcja zagraniczna kompensatora wnętrznego



Rys. 8. Wykres podziału kosztów urządzenia kompensatora synchronicznego o mocy 35 MVA z chłodzeniem wodnym

wego chłodzonego powietrzem w obiegu zamkniętym z chłodnicami ustawionymi z boków maszyny. Rozruch odbywa się przy pomocy silnika asynchronicznego synchronizowanego. Moc kompensatora 40 MVA, prędkość 1000 obr/min, napięcie znamionowe 22 kV. W danym rozwiązaniu kompensator ustawiono na prostym, wystającym około 75 cm ponad poziom podłogi, fundamencie blokowym. Konstrukcję kompensatora tak opracowano, że do jego montażu wystarczają podręczne przenośne urządzenia dźwigowe o nośności 3 t (należy zaznaczyć, że wirnik maszyny waży 61 t, a stojan 54 t). Rozwiązanie to łączy w sobie zalety ustawienia napowietrznego (jak prosty fundament blokowy) oraz wewnętrznego (np. dogodność obsługi).

12. Koszty.

Kompensator synchroniczny jest urządzeniem stosunkowo drogie. Instalowanie kompensatora jest dość poważną inwestycją. Jako koszt orientacyjny można podać, że jeden kompensator dużej mocy kosztuje wraz ze wszystkimi urządzeniami pomocniczymi i budynkiem (wewnętrzny, chłodzony powietrzem przy dwu maszynach w hali) około 4,0–6,0 mln. zł. W przeliczeniu na 1 MVA mocy maszyny koszt instalacji tego typu kompensatora wynosi około 160–180 tys. zł. Trzeba podkreślić, że większość tych kosztów na razie, póki nasz przemysł nie produkuje wielkich maszyn synchronicznych, stanowią koszty dostaw zagranicznych. Konieczne więc jest gruntowne przeanalizowanie projektu instalacji z punktu widzenia ekonomicznego.

Do zorientowania się co do podziału kosztów na poszczególne pozycje może służyć wykres (rys. 8), wykonany dla zaprojektowanej już instalacji kompensatora o mocy 35 MVA, ustawionego w hali, chłodzonego powietrzem w obiegu zamkniętym (urządzenie zgodne z opisem podanym wyżej). W przybliżeniu połowa kosztów urządzenia kompensatorowego przypada na samą maszynę synchroniczną, pozostała

część kosztów przypada na silnik rozruchowy, aparaturę elektryczną, halę, fundament, chłodzenie, suwnicę, połączenie z transformatorem oraz montaż maszyny.

13. Wnioski.

Przy projektowaniu urządzenia kompensatora synchronicznego powinny być brane pod uwagę potrzeby i wymagania sieci, z którą kompensator ma współpracować. Należy z tego punktu widzenia gruntownie przeanalizować schemat połączenia kompensatora ze stacją dążącą do zastosowania prostego układu blokowego. Dostosowania do potrzeb sieci wymaga wzbudzenie maszyny i jego regulacja. Uwzględniając warunki sieciowe należy dążyć do jak najprostszyszych sposobów rozruchu, stosując — o ile to możliwe — rozruch przy pomocy dławika. Najdogodniejszym sposobem ustawienia kompensatora jest ustawienie napowietrzne w sąsiedztwie stanowiska transformatora. Sposób chłodzenia kompensatora należy dobierać w zależności od warunków lokalnych. Sposób montażu kompensatora winien być szczegółowo przeanalizowany przez projektanta urządzenia wraz z konstruktorem maszyny; należy przy tym dążyć do zastąpienia suwnicy urządzeniami tańszymi i prostszymi.

LITERATURA

- [1] Guriewicz E. J. Eksploatacja synchronnych kompensatorów, 1952
- [2] Syromiatnikow J. A. Riežymy raboty synchronnych gienieratorow, 1952
- [3] Syromiatnikow J. A. Praca silników asynchronicznych, PWT, 1953
- [4] Siołowiec J. J. Awtomatizacja energietycznych sistem, 1950
- [5] Komar E. G. Turbogienieratory z wodorodnym ochładzaniem, 1948
- [6] Borowikow W. A., Sobolew M. J. Montaż i remont synchronnych kompensatorow bez mostowowo krana (Rabochy Energetik, 1952, 3)
- [7] Large Synchronous Condenser — 40 MVA (Electr. Review, 6.3.1953)

MGR INŻ. WACŁAW DEMEL

Krak. Biuro Proj. Sieci Elek.

Linie elektroenergetyczne o pełnym wyzyskaniu izolacji drewna

621.315:614.4:621.315.177:621.3.014.33

Treść. Linie o poprzecznikach drewnianych i ich zalety eksploatacyjne spowodowane wysoką wytrzymałością udarową. Konstrukcje istniejących linii z punktu widzenia wytrzymałości udarowej. Sposób obliczania wskaźników wytrzymałości udarowej oraz wyniki obliczeń tych wskaźników dla linii istniejących. Zasady konstrukcyjne linii o pełnym wyzyskaniu izolacji drewna.

Линии электропередачи с полным использованием изоляции дерева. Линии с деревянными трассами и их преимущество в эксплуатации благодаря большой импульсной прочности. Конструкции существующих линий с точки зрения их импульсной прочности. Способ расчета указателей этой прочности и результаты их расчета для существующих линий. Основы конструкции линий с полным использованием изоляции дерева.

Transmission lines making full use of wood insulation. Lines with wooden cross-arms, and their operational values resulting from high impulse strength. Designs of existing lines as reviewed from the point of their impulse strength. Method of calculating impulse strength indices, and results of such computations for existing lines. Principles of designing transmission lines having wood insulation.

1. Wstęp.

Spóżyte energii elektrycznej w przemyśle, rolnictwie i dla potrzeb kulturalno-życiowych ludności wzrasta coraz bardziej. Rozszerzają się w związku z tym układy sieciowe. Nowo budowane linie muszą być pewne w eksploatacji, trwałe i tanie. Pewność ruchu na liniach istniejących powinna stale wzrastać.

Linie energetyczne są wystawione na działanie żywiołowych sił przyrody w większym stopniu niż wiele innych urządzeń. Siłom tym powinny one przeciwstawić się skutecznie, aby spełnić zasadniczy warunek — zapewnić regularną dostawę energii. Poważnym czynnikiem wywołującym zakłócenia w dostawie energii są — jak wiadomo — pioruny uderzające w linie lub w pobliżu linii. Wyładowania piorunowe występują w naszym kraju przez stosunkowo długi okres — od kwietnia do września.

W początkach rozwoju energetyki rozpowszechniony był pogląd, że nie ma całkowicie skutecznych zabezpieczeń linii elektrycznych przed skutkami uderzeń piorunów. Znalazło to swoje odbicie w przepisach budowy linii wielu krajów, które uwzględniały swego czasu jedynie wytrzymałość elektryczną linii uwarunkowaną przepięciami wewnętrznymi — łączeniowymi — bez brania pod uwagę przepięć zewnętrznych wywołanych przez elektryczność atmosferyczną. Pogląd taki wyrażony jest również w obowiązujących obecnie w Polsce przepisach budowy linii napowietrznych — PN/E-101. Jednakże liczne próby laboratoryjne i doświadczenia eksploatacyjne

wykazały, że napowietrzne linie elektryczne mogą przeciwstawić się skutecznie znacznej liczbie przepięć zewnętrznych.

Znane obecnie sposoby skutecznej ochrony linii i całych układów sieciowych od skutków przepięć zewnętrznych można podzielić na dwie grupy: a) ochrona odgromowa „konstrukcyjna” — zależna od materiału i konstrukcji linii; b) ochrona odgromowa „przyrządowa”, wymagająca specjalnych przyrządów lub urządzeń bądź w samych liniach, bądź w pracujących z nimi stacjach transformatorowych. Pierwsza z tych ochron musi być uwzględniona przy projektowaniu i budowie linii, druga może być stosowana stosunkowo łatwo do układów już istniejących.

Do pierwszej grupy należą: 1) linie z przewodami odgromowymi, 2) linie o pełnym wyzyskaniu udarowej izolacji drewna, tj. o słupach i poprzecznikach drewnianych. Do drugiej grupy należą: 3) odgromniki, iskierniki, dławiki szeregowe, kondensatory, 4) transformatory i dławiki gaszące, 5) urządzenia szybkiego ponownego załączania — SPZ.

Przedmiotem niniejszego artykułu są linie o poprzecznikach drewnianych. Linie takie wykazują dużą odporność na udary, jednakże te ich zalety nie są u nas jeszcze dostatecznie doceniane, co nie sprzyja masowemu ich stosowaniu.

Ochrona odgromowa konstrukcyjna sprowadza się u nas przeważnie do stosowania przewodów odgromowych w liniach na słupach stalowych. Skuteczność ochronna dobrze uziemionych przewodów odgromowych jest znana i dlatego stosuje się je u nas szeroko do linii 110- i 220-kilowoltowych, stano-

wiących podstawę energetyczną sieci krajowej. Podwyższenie kosztów takich linii wskutek zastosowania przewodów odgromowych wynosi około 3% dla linii dwutorowych i 5% dla linii jednotorowych, jest więc stosunkowo małe i całkowicie gospodarczo uzasadnione.

Przeważająca część istniejących i budowanych obecnie linii średnich napięć (6, 15, 30 oraz 60 kV) ma słupy drewniane i jest bez przewodów odgromowych.

Szerokie stosowanie drewna do budownictwa liniowego wynika z jego korzystnych właściwości mechanicznych i łatwej stosunkowo osiągalności na rynku. Jednakże w liniach dotychczasowych nie uwzględniano się wytrzymałości udarowej drewna i poprzeczniki ich wykonywane były z reguły ze stali. Przy braku przewodów odgromowych wszystkie udary w taką linię trafiają w przewody robocze i przeważnie doprowadzają do zwarcć międzyfazowych poprzez poprzecznik stalowy powodując tym częste zakłócenia w pracy.

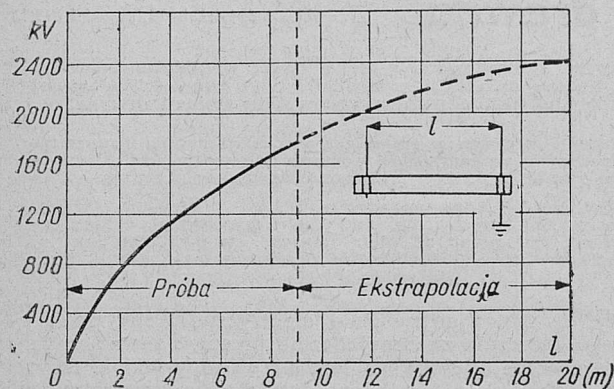
2. Wyzyskanie izolacji drewna.

Wprowadzenie w liniach o słupach drewnianych dodatkowej izolacji pomiędzy izolatory w postaci poprzecznika drewnianego zmniejsza znacznie możliwość powstania przeskoku udarowego.

Drewno używane do budowy słupów i poprzeczników odznacza się, jak wykazały badania, znaczną wytrzymałością udarową — 200 do 400 kV/m.b. (rys. 1); wytrzymałość ta spada nieznacznie nawet po zmożeniu powierzchni drewna przez deszcz.

Istniejące linie o słupach drewnianych i poprzecznikach stalowych można podzielić z punktu widzenia wytrzymałości udarowej i wartości eksploatacyjnej w okresie burzowym na zupełnie złe i możliwe do przyjęcia. W wielu z nich można byłoby podwyższyć wytrzymałość udarową stosunkowo łatwo w czasie renowacji i kapitalnych remontów.

Do zdecydowanie złych konstrukcji pod względem odporności udarowej należy przede wszystkim stosowany bardzo często układ przewodów trójkątowy — „jednoprzecznikowy” (lirowy). Zastosowanie „liiry” łączącej metalicznie trzony izolatorów wszystkich faz prowadzi przy większości przeskoku udarowych do zwarcć międzyfazowych. Występuje to niezależnie od długości słupa drewnianego, izolującego do-



Rys. 1. Zależność 50% napięcia przeskoku od długości drewna

statecznie cały układ przewodów od ziemi, gdyż — wskutek niskiej wytrzymałości udarowej izolatorów średnich napięć — większość uderzeń piorunu powoduje przeskoki w dwóch lub w trzech fazach.

Należy zaznaczyć, że w układzie trójkątowym jednoprzecznikowym górny przewód roboczy spełnia rolę swego rodzaju przewodu odgromowego względem dwu pozostałych przewodów dolnych, gdyż tworzy dla nich kąt ochronny rzędu 30° i przyjmuje około 99% wszystkich bezpośrednich uderzeń piorunów. Przy niewytrzymałej na udary izolacji tego przewodu każdy udar prowadzi do przeskoku odwrotnych i zwarcć międzyfazowych. W takim przypadku nawet zastosowanie dolnego poprzecznika metalowego, lecz oddzielnego od konstrukcji metalowej dla górnego przewodu dostateczną długością drewna (około 1,5 m) powinno zmniejszyć liczbę uszkodzeń burzowych takiej linii.

Równie często spotykana jest zła konstrukcja pod względem wytrzymałości udarowej przy układzie trójkątowym „trójpoprzecznikowym”, kiedy stosuje się na słupach przelotowych nie trzony hakowate, lecz konstrukcje stalowe typu

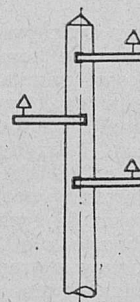
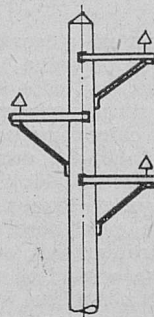
wysięgników, spoczywające ze względów mechanicznych na podpórkach stalowych. Podpórki te zwierają prawie całkowicie drewno słupa, izolując poszczególne fazy.

W obu powyższych układach przewodów nie zwraca się zwykle uwagi na wytrzymałość udarową słupów mocnych, które z reguły zwierają swymi konstrukcjami stalowymi drewno dzielące fazy, a wszak słupy te powinny mieć wytrzymałość udarową co najmniej taką samą, jak słupy przelotowe.

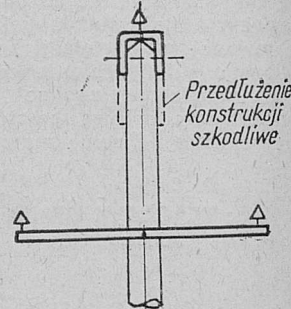
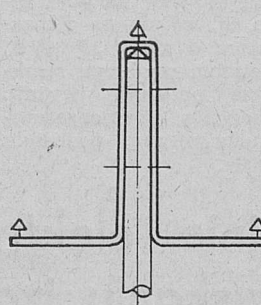
Często występuje potrzeba zmiany powyższych układów przewodów na układ płaski nawet wtedy, kiedy nie stosuje się go od razu na całej linii. W takim przypadku drewno

Rozwiązania złe

Rozwiązania dobre

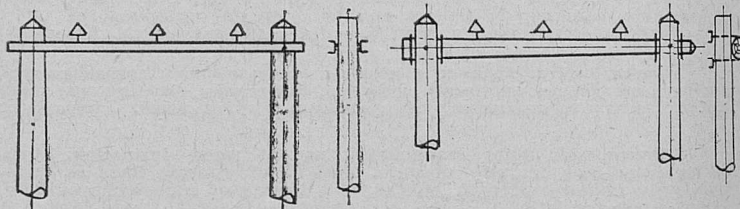


A. Układ trójkątowy trójpoprzecznikowy



Przedłużenie konstrukcji szkodliwe

B. Układ trójkątowy jednoprzecznikowy (lirowy)



C. Układ płaski

Rys. 2. — Rozwiązania konstrukcyjne istniejących linii średnich napięć — złe i dobre pod względem wyzyskania izolacji drewna

nogi słupa nie może być już wyzyskane częściowo jako izolacja fazowa i jedynie zastosowanie poprzecznika drewnianego zamiast stalowego może zwiększyć wytrzymałość udarową takiej linii.

Przykłady złych i dobrych konstrukcji — z punktu widzenia wytrzymałości udarowej dla istniejących linii średnich napięć — przedstawione są na rys. 2.

3. Wytrzymałość udarowa linii.

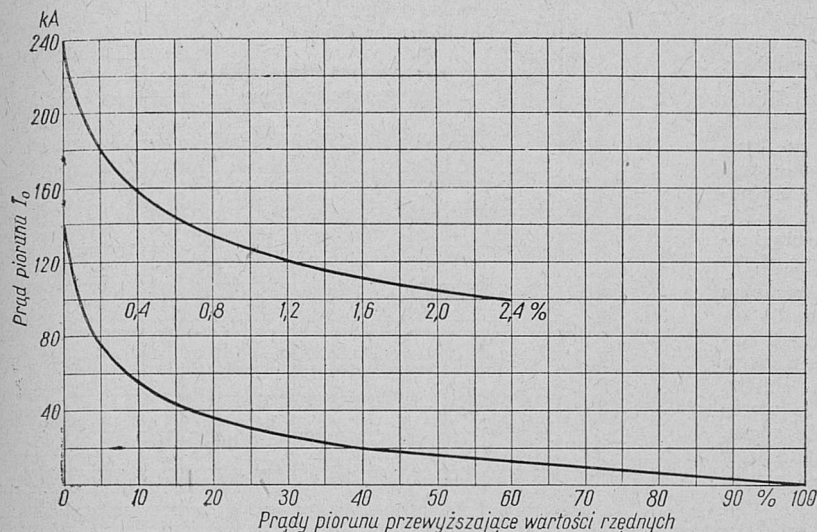
Dla ilościowego porównania odporności odgromowej linii różnych konstrukcji i o różnych sposobach zabezpieczenia od przepięć atmosferycznych stosuje się różne wskaźniki. Jednym z tych wskaźników jest względna roczna liczba wyłączeń dla 100 km danej linii przy 20 dniach burzowych w ciągu roku; odwrotność tej wartości nazywa się *wskaźnikiem udarowym linii*. Przedstawia on czas wyrażony w latach lub częściach roku przypadający na jedno wyłączenie linii wywołane przez pioruny. Linie o wyższym wskaźniku udarowym mają więc lepszą odporność odgromową. Niżej omówimy główne czynniki wpływające na wskaźnik udarowy linii.

Częstość występowania piorunów i ich natężenie zależy od położenia geograficznego i od pory roku. W klimacie gorącym i umiarkowanym natężenia prądu piorunu mogą docho-

dział do kilkuset kiloamperów. Prawdopodobieństwo występowania piorunów o amplitudzie prądu I_0 kiloamperów*) ustalone na podstawie wieloletniej statystyki różnych krajów, przedstawione jest na rys. 3. Krzywa ta odpowiada wzorowi:

$$(1) \quad I_g = (\Psi_i)\% = 1,8 \frac{I_0}{70}$$

Prawdopodobieństwo trafienia piorunu w linię zależy od częstości burz występujących w danej okolicy, oraz od średniej wysokości linii. Liczbę dni burzowych określa się na podstawie mapy krzywych „izoceraunicznych”, łączących miejscowości o tej samej liczbie dni burzowych. Przy 20 dniach bu-



Rys. 3. Prawdopodobieństwo występowania piorunów o różnych natężeniach

rzowych w roku, co jest wartością średnią w naszym kraju, liczbę uderzeń piorunów w linię — w zależności od jej wysokości — oblicza się ze wzoru empirycznego:

$$(2) \quad N_u = 1,2 \cdot h_o$$

przy czym $h_o = h_g - 2/3 f_{+10}$,

gdzie h_g — średnia wysokość zawieszenia przewodu odgromowego lub najwyższego roboczego na słupie, f_{+10} — zwis w temperaturze $+10^\circ\text{C}$.

Przejście przeskoku udarowego w łuk międzyfazowy, podtrzymany następnie przez prąd płynący w linii, zależy od średniego natężenia pola na drodze przeskoku. Wartość tego natężenia dla linii o metalowych uziemionych poprzecznikach jest:

$$(3) \quad K_{sr.m} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot n \cdot l_i} \quad (\text{kV/m}),$$

a dla linii o poprzecznikach nie uziemionych, drewnianych:

$$(3') \quad K_{sr.d} = \frac{U_n}{2 \cdot n \cdot l_i + l_d} \quad (\text{kV/m}),$$

gdzie U_n — napięcie znamionowe linii (kV),
 l_i — długość drogi przeskoku wzdłuż jednego izolatora,
 n — liczba ogni w łańcuchu izolatorowym,
 l_d — długość drogi przeskoku wzdłuż drewna pomiędzy fazami.

Prawdopodobieństwo przejścia przeskoku udarowego w łuk można obliczyć ze wzoru empirycznego:

$$(4) \quad \Psi_i \% = 1,6 K_{sr} - 6.$$

Ponieważ roczna liczba przeskoków może osiągnąć wartość:

$$N_p = \Psi_i \cdot N_u,$$

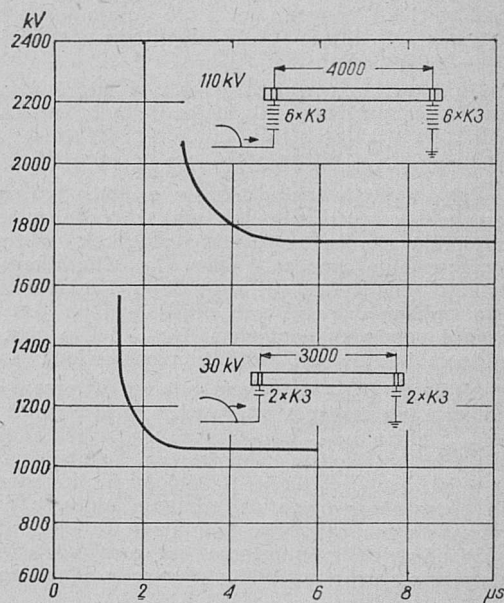
przeto względna liczba odłączeń — na 100 km linii i 20 dni burzowych — wyniesie

$$n_o = \Psi_i \cdot N_p.$$

*) Jest to tzw. obliczeniowy prąd piorunu przy uderzeniu w dobrze uziemiony punkt (o oporności sprowadzonej do zera).

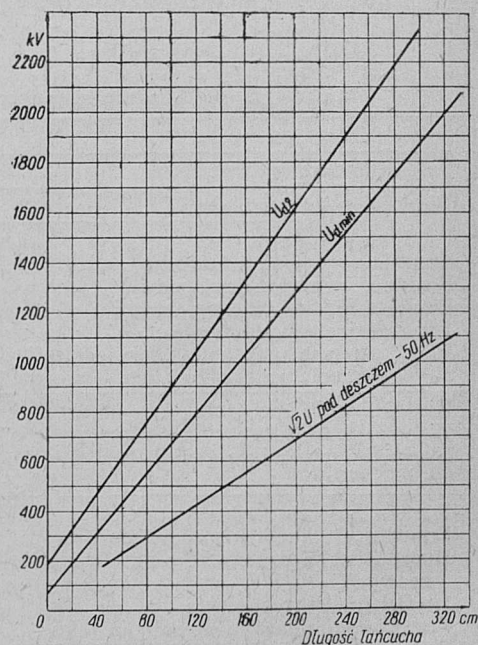
Zachowanie się izolacji linii zależy, jak wiadomo, od przebiegu fal wędrownych, wywołanych uderzeniem piorunu. Teoretyczne rozważania rozchodzenia się fal wzdłuż linii wykazują, że najniekorzystniejszy wypadek najwyższego napięcia powstaje wówczas, kiedy piorun uderzy w wierzchołek uziemionego słupa. Napięcie można wtedy obliczyć ze wzoru:

$$(5) \quad U_{\max} = x \cdot R_s \cdot I_0 - x^2 \cdot L_s \cdot i_0,$$



Rys. 4. Charakterystyka udarowa izolacji międzyfazowej linii 110- i 30-kilowoltowej o poprzecznikach drewnianych

gdzie $x = \frac{Z_{10}}{Z_{10} + R_s}$ — współczynnik przepuszczenia fali piorunu uderzającego w słup,
 Z_{10} — oporność zastępcza równoległe połączonych oporności kanału piorunu i przewodów odgromowych (Ω),
 R_s — oporność uziemienia słupa (Ω),
 L_s — indukcyjność słupa (μH),
 $i_0 = \frac{di}{dt} \cong \frac{I_0}{t}$ — stromość fali prądowej ($\text{A}/\mu\text{s}$).



Rys. 5. Napięcia U_{dmin} i U_{2d} dla łańcuchów izolatorów LK 280 (K3)

Dla oporności falowej kanału piorunu $Z_{00} = 300 \Omega$, oporności falowej przewodów odgromowych $Z_1 = 250 \Omega$, i oporności uziemienia słupa $R_s = 10 \Omega$, przyjmuje się $x = 0,9$; indukcyj-

ność słupa L_s dla słupów nie przekraczających 50 m wysokości przyjmuje się równą $0,5 \mu\text{H/m}$; $\frac{I_0}{t}$ — przyjmuje się stałe dla czasu 2 μs .

Jeżeli napięcie na wierzchołku słupa jest zbyt duże i większe od wytrzymałości udarowej izolacji — następuje przeskok odwrotny od konstrukcji słupa do przewodu roboczego. Zależnie od kształtu i amplitudy fali przeskok może nastąpić bądź w chwili, gdy napięcie nie doszło jeszcze do maksimum na czole fali, bądź — gdy amplituda została już przekroczona — na grzbiecie fali.

Do określenia wytrzymałości izolatorów za pomocą prób udarowych przyjmuje się najczęściej najniższe napięcie przeskoku na grzbiecie fali, tzw. 50-procentowe napięcie przeskoku — U_{dmin} , które powoduje przeskoki w 50% wypadków.

Przy występowaniu udarów w linii przeważająca liczba przeskoków występuje, jak wykazały badania, na czole fali. Przyjmuje się, że najczęstszy przeskok występuje po 2 μs ; napięcie takie oznaczmy przez U_{d2} . Charakterystyka udarowa izolacji międzyfazowej linii 30- i 110-kilowoltowej o poprzecznikach drewnianych przedstawiona jest na rys. 4. Zależność pomiędzy napięciami U_{dmin} i U_{d2} oraz długością łańcucha izolatorów LK 280(K3) przedstawiona jest na rys. 5.

Napięcie U_{max} wywołane udarem w przewody odgromowe indukuje na każdym przewodzie roboczym napięcie $U_r = k \cdot U_{\text{max}}$, gdzie k — współczynnik sprzężenia, tj. stosunek napięcia na przewodzie odgromowym do napięcia indukowanego na przewodzie roboczym. Współczynniki sprzężenia oblicza się początkowo bez uwzględnienia ulotu, a następnie wprowadza się mnożnik uwzględniający tłumiące działanie ulotu.

Współczynnik sprzężenia bez uwzględnienia ulotu zależy od geometrycznego układu przewodu i oblicza się ze wzoru

(6)
$$k' = \frac{\lg \left[\frac{D_{12}}{d_{12}} \right]}{\lg \left[\frac{2 h_{sr}}{r_{sr}} \right]}$$

gdzie D_{12} — odległość jednego przewodu od zwierciadlanego odbicia przewodu drugiego (traktując powierzchnię ziemi jako umyślane zwierciadło),

d_{12} — odległość jednego przewodu od drugiego,

h_{sr} — średnia wysokość przewodu odgromowego nad ziemią,

r_{sr} — promień przewodu odgromowego.

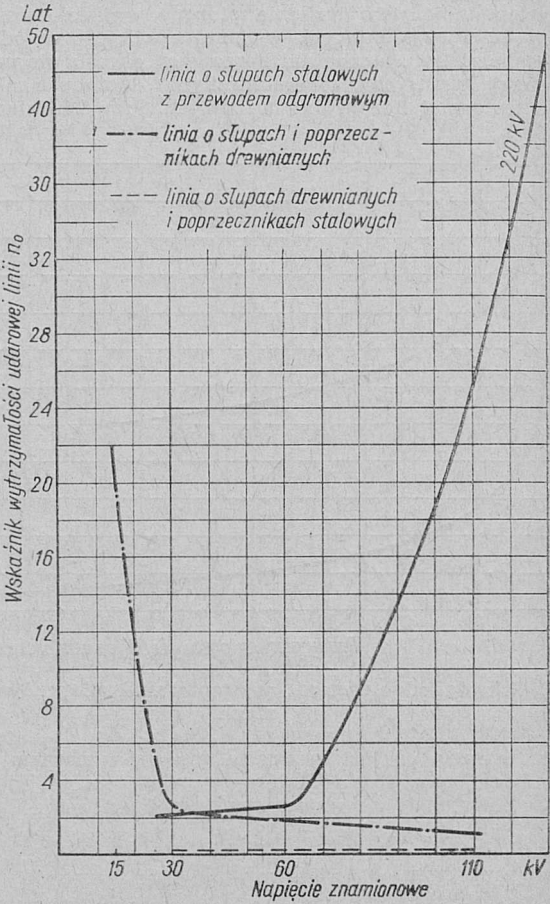
Współczynnik sprzężenia z uwzględnieniem ulotu dla linii z jednym przewodem odgromowym można obliczyć za pomocą wzoru

(7)
$$k_1 = \lambda \cdot k',$$

dla linii zaś z dwoma przewodami odgromowymi — ze wzoru

(8)
$$k_2 = \frac{k'_{31} + k'_{32}}{\frac{1}{\lambda} + k'_{21}},$$

gdzie liczby 1, 2 oznaczają kolejne przewody odgromowe,



Rys. 6. Wytrzymałość udarowa różnych rodzajów linii

a 3 — przewód roboczy. Współczynnik ulotu λ oblicza się ze wzoru:

(9)
$$\lambda = 1,32 \left[1 + \frac{2 U_s}{h_{sr}} \right],$$

Tablica I. Wskaźniki udarowe linii na słupach drewnianych przy płaskim układzie przewodów

Napięcie znamionowe	kV	15	30	110	15	30	110
Przekrój znamionowy	mm ²	95	95	120	95	95	120
Materiał poprzeczników		Stal			Drewno		
Promień przewodu	mm	6,7	6,7	7,85	6,7	6,7	7,85
Średnia wysokość przewodu	m	8,7	8,7	9,0	8,7	8,7	9,0
Pozioma odległość przewodu	m	3,0	3,0	4,1	3,0	3,0	4,1
Długość izolacji między fazami	m	0,54	0,68	2,0	3,54	3,68	6,1
Długość izolacji do ziemi	M	12,8	13,0	15,4	14,3	14,5	17,5
50 % napięcia przeskoku „faza — faza”	MV	0,46	0,58	1,22	1,06	1,18	2,04
50 % napięcia przeskoku „faza — ziemia”	MV	2,6	2,7	3,54	2,9	3,0	3,96
Współczynnik sprzężenia bez ulotu	k	0,226	0,226	0,208	0,226	0,226	0,21
Współczynnik sprzężenia z ulotem	ku	0,351	0,364	0,364	0,418	0,432	0,536
Napięcie wywołujące przeskok	MV	0,71	0,91	1,73	1,82	2,08	3,96
Poziom udarowy	kA	5,92	7,6	16,0	15,2	17,3	29,3
Roczna liczba udarów		10,4	10,4	10,8	10,4	10,4	10,8
Prawdopodobieństwo prądu piorunu	%	79,7	68,1	54,1	55,7	51,3	33,1
Roczna liczba przeskoków na 100 km linii i 20 dni burzowych		8,3	7,1	5,9	5,8	5,4	3,6
Średni gradient napięcia	kV/m	27,8	51,8	55,0	4,25	8,15	18,0
Prawdopodobieństwo powstania łuku	%	38,5	77,0	76,5	0,8	7,0	23,0
Względna liczba odłączeń na 100 km linii i 20 dni burzowych w ciągu roku		3,2	5,5	4,5	0,046	0,38	0,82
Wskaźnik wytrzymałości udarowej	lat	0,3	0,18	0,22	21,8	2,6	1,22

Tablica II. Wskaźniki udarowe linii na słupach stalowych z przewodami odgromowymi

Napięcie znamionowe		kV	220 IR	220 G	110	110	60	30
Układ przewodów			plaski	plaski	plaski	dwu-trójkąt	dwu-trójkąt	trójkąt
Średnia wysokość przewodu odgromowego	m	19,2	21,0	13,4	16,3	15,2	16,3	
Średnia wysokość przewodu roboczego	m	12,4	14,2	9,4	9,3	9,3	12,2	
Odstęp pionowy przewodu odgromowego od roboczego	m	6,8	6,9	4,1	6,7	4,2	3,1	
Odstęp poziomy przewodów odgromowych	m	10,2	12,0	5,6	10,8	5,3	0	
Odstęp poziomy przewodów roboczych	m	8,7	8,5	4,3	3,5	3,6	3,6	
Roczna liczba udarów w linii		23	25,2	18,3	19,5	18,3	19,6	
Liczba ogniów LK 280		14	14	6	6	4	2	
Długość drogi przeskoku	m	2,1	2,1	0,93	0,93	0,68	0,34	
Średni gradient napięcia	kV/mb	60,5	60,5	68,5	68,5	51	51	
Prawdopodobieństwo łuku	%	91	91	100	100	76	76	
50-procentowe napięcie udarowe przeskoku	MV	1,24	1,24	0,524	0,524	0,475	0,29	
Napięcie udarowe przeskoku po 2 μ s	MV	1,57	1,57	0,67	0,67	0,605	0,39	
Udar w przewód roboczy	Kąt ochrony	stopnie	28	20	20	10	23	24,5
	Prawdopodobieństwo przedarcia piorunu	%	0,25	0	0	0	0,14	0,17
	Poziom udarowy	kA	10,3	10,3	4,4	4,4	4,0	2,4
	Prawdopodobieństwo prądu	%	67,3	67,3	84,5	84,5	85,8	91,4
Udar w słup	Względna liczba odłączeń		0,035	0	0	0	0,17	0,023
	Oporność udarowa uziemienia	Ω	10	10	6	6	6	6
	Spółczynnik sprzężenia		0,295	0,349	0,382	0,281	0,335	0,270
	Spółczynnik sprzężenia z ulotem		0,46	0,54	0,544	0,465	0,44	0,36
Względna liczba odłączeń	Poziom udarowy	kA	200	223	160	127	92,5	43,5
	Prawdopodobieństwo prądu	%	0,047	0,019	0,22	0,76	2,9	18,6
Względna liczba odłączeń			0,009	0,0043	0,04	0,15	0,4	1,82
Wskaźnik wytrzymałości udarowej		lat	23	230	25	6,7	2,5	0,55

gdzie U_s — napięcie na przewodzie odgromowym w megawoltach.

Mając współczynnik sprzężenia linii o danej konstrukcji można obliczyć napięcie indukowane na przewodzie roboczym:

$$U_r = k \cdot U_{\max}.$$

Napięcie pomiędzy przewodem odgromowym a przewodem roboczym wynosi:

$$U = U_{\max} - k \cdot U_{\max} = U_{\max} \cdot (1 - k).$$

Widoczny jest tu wpływ k na zmniejszenie napięcia. Największą wartość napięcia U nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnego napięcia przeskoku dla izolatora, jak również dla odległości pomiędzy przewodem roboczym a odgromowym w środku przęsła.

Ponieważ przyjmuje się, że $U = U_{d2}$, przeto maksymalne dopuszczalne napięcie na wierzchołku słupa — by zapobiec przeskokowi odwrotnemu, powinno być:

$$U_{d\max} = \frac{U_{d2}}{1 - k}.$$

Widać więc, że wskutek sprzężenia pomiędzy przewodami roboczymi i odgromowymi napięcie na konstrukcji słupa może być większe bez wywołania przeskoku odwrotnego.

Jeżeli wartość $U_{d\max}$ wprowadzimy do wzoru (5), to otrzymamy:

$$(10) \quad I_0 = \frac{U_{d2}}{1 - k} \cdot \left[\frac{1}{x \cdot R_S - \frac{x^2 \cdot L_S}{t_1}} \right],$$

gdzie I_0 (w kA) dopuszczalny prąd piorunu przy bezpośrednim uderzeniu w słup, k — współczynnik sprzężenia z uwzględnieniem ulotu, t_1 — czas narastania prądu piorunu — 2 μ s, pozostałe oznaczenia jak poprzednio. Prąd I_0 nazywa się poziomem udarowym linii przy bezpośrednim uderzeniu w słup. Stanowi on jeden z głównych wskaźników określających wytrzymałość udarową linii.

Jeżeli piorun uderzy bezpośrednio w przewody robocze, wówczas fala napięcia oddziałuje na izolację linii bądź przez poprzecznik i nogę słupa do ziemi, bądź w środku przęsła, gdzie przewód znajduje się najbliżej ziemi. Jednakże ponieważ poziom izolacji międzyfazowej jest niższy niż względem ziemi, przeskoczek międzyfazowy następuje zwykle wcześniej. W przypadku uderu w przewody robocze napięcie pomiędzy fazami jest również zmniejszone przez sprzężenie elektromagnetyczne przewodów, jak w przypadku istnienia przewodów odgromowych.

Z rozważań teoretycznych rozchodzenia się fal wynika, że zastępcza oporność falowa Z_z , dla założonej oporności kanału piorunu $Z_0 = 300 \Omega$ i oporności falowej przewodów roboczych $Z_3 = 400 \Omega$ wyniesie:

$$Z_z = \frac{Z_3 Z_0}{Z_3 + 2 \cdot Z_0} = \frac{400 \cdot 300}{400 + 600} = 120 \Omega,$$

a napięcie maksymalne $U = Z_z \cdot I_0 = 120 \cdot I_0$ nie powinno przekroczyć wartości $U_{d\min}$, tj. minimalnego napięcia przeskoku łańcucha izolatorów. Stąd otrzymuje się:

$$(11) \quad I_0 = \frac{U_{d\min}}{120}.$$

Jest to dopuszczalny poziom udarowy linii przy bezpośrednim uderzeniu piorunu w przewód roboczy. Jest on znacznie niższy od poziomu udarowego przy uderzeniu w słup, obliczonego według wzoru (20).

Uwzględniając wymienione wyżej zjawiska i częstość ich występowania, wykonano obliczenia linii o poprzecznikach stalowych i linii o poprzecznikach drewnianych bez przewodów odgromowych. Wytrzymałość udarową drewna przyjęto 200 kV/mb. Obliczenia te dla linii o płaskim układzie przewodów dla napięć 15, 30 i 110 kV są zestawione w tabl. I. Dla porównania podano w tabl. III wytrzymałości udarowe linii typowych na słupach stalowych z przewodami odgromowymi.

Porównanie wskaźników wytrzymałości udarowej z obu tych tablic oraz krzywych z rys. 6 wykazuje, że linie o poprzecznikach drewnianych mają znacznie wyższy poziom udarowy od linii podobnego typu o poprzecznikach stalowych i nie ustępują pod tym względem, dla napięć średnich, liniom z przewodami odgromowymi. Wytrzymałość udarowa linii 15-kilowoltowej jest przeszło 70-krotnie, 30-kilowoltowej 15-krotnie, a 110-kilowoltowej 5-krotnie większa od linii z poprzecznikami stalowymi. Widać więc, że linie o poprzecznikach drewnianych mają dużą wartość eksploatacyjną. Powinny one być stosowane przede wszystkim dla napięć średnich, gdzie ich zalety udarowe mogą być najbardziej wykorzystane, gdyż linie takie ze względu na niewielką moc przesyłaną i masowość występowania powinny być, ze względów gospodarczych, budowane jak najtaniej.

Jednakże szerokie stosowanie takich linii napotyka u nas duże trudności z powodu rozpowszechnionego poglądu, że drewniane poprzeczniki, znajdujące się w pozycji poziomej, próchnieją znacznie szybciej od ustawionych pionowo słupów. Wywołane to ma być zbieraniem się wody w szczelinach górnej powierzchni poprzecznika, co zapewniać ma wilgoć po-

trzebną do rozwoju grzybów niszczących tkanę drzewną. Nie ma jednak dostatecznych podstaw do uogólnienia tych przypuszczeń. Notowane w eksploatacji wypadki szybszego próchnienia drewna ustawionego poziomo — sprowadzają się bądź do słupów składowanych w pozycji leżącej, a więc — wskutek małego przewiewu — znajdujących się w specjalnie niekorzystnych warunkach, bądź do drewna złej jakości lub źle nasycanego. Drewno poprzeczników nasiąka wprawdzie łatwiej wodą niż słupy, ale wiatr i słońce osuszają je również dużo łatwiej aniżeli np. przyziemne części słupów pionowych. Związek Radziecki stosuje prawie wyłącznie w liniach o słupach drewnianych poprzeczniki drewniane; literatura tego kraju nie podkreśla jednak szybszego próchnienia poprzeczników. Dopiero szczegółowa analiza statystyk eksploatacyjnych w naszych warunkach oraz szeroko zakrojone badania laboratoryjne mogą wyjaśnić, jak w naszej praktyce zachowują się poprzeczniki drewniane.

4. Założenia i konstrukcja linii o poprzecznikach drewnianych.

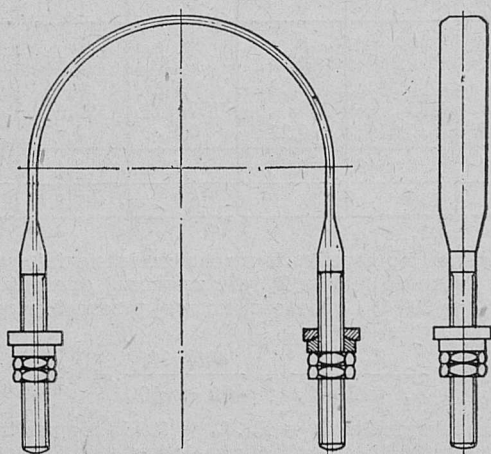
Krakowskie Biuro Projektów Sieci Elektrycznych opracowało na zlecenie Ministerstwa Energetyki linie typowe o poprzecznikach drewnianych dla napięć 15, 30 i 110 kV.

Przy opracowywaniu tych linii przyjęto założenia konstrukcyjne dotyczące typów i naprężeń przewodów, rodzaju słupów, ustojów itp. takie, jak w liniach dotychczasowych o po-

zmniejsza jednakże odporność drewna na próchnienie wskutek odsłaniania wewnętrznych, nie nasyconych, warstw. Zapobiegać rozmieleniu powinny w dużej mierze odpowiednie konstrukcje metalowe odprowadzające prądy udarowe po powierzchni drewna.

Zapalenie drewna wywołane jest przez prądy o częstotliwości technicznej spływające do ziemi wskutek częściowego osłabienia izolacji izolatorów porcelanowych, wywołanego zabrudzeniem lub uszkodzeniami mechanicznymi. Zapalenie drewna wymaga równoczesnego zbiegu kilku niekorzystnych okoliczności, jak np. powierzchniowego zwilżenia wyschniętego drewna przy równoczesnym uszkodzeniu izolatorów i dlatego występuje na ogół rzadko. Jednakże w przeciwnieństwie do rozmielenia zapalenie prowadzi szybko do trwałych uszkodzeń słupów wymagających natychmiastowego wyłączenia linii. Zapalenie występuje najczęściej w miejscach luźnych styków, np. poprzecznika ze słupem, izolatora z poprzecznikiem. Zapobiec można mu więc przez stworzenie połączeń konstrukcyjnych pewnych i sprężystych. Zapalenie drewna jest główną przyczyną nie pozwalającą na stosowanie linii o słupach drewnianych w okolicach uprzemysłowionych, gdzie atmosfera powoduje szybkie zabrudzenie izolatorów.

Aby spełnić wymagania punktu c) stosuje się na podejściach do stacji transformatorowych punkty osłabionej izolacji za pomocą uziemionych iskierników w sposób podany



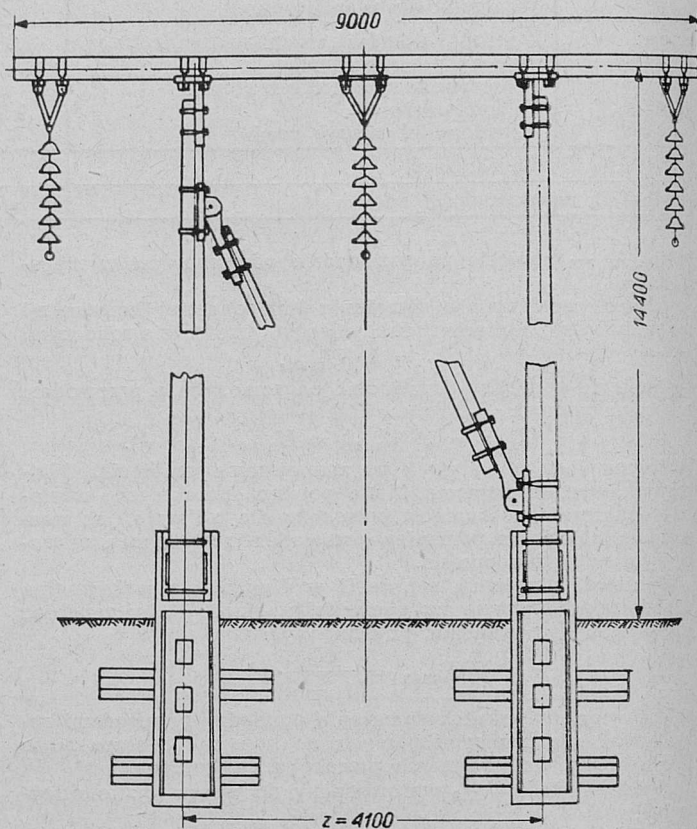
Rys. 7. Objemka do łączenia drągów słupów liniowych

poprzecznikach stalowych i dlatego dane te nie będą tu omawiane, poruszone będą natomiast zagadnienia wiążące się bezpośrednio z zastosowaniem poprzeczników drewnianych. Są to przede wszystkim:

- a) zapewnienie poprzecznikowi największej trwałości i odporności na niszczące działanie grzybów;
- b) zmniejszenie możliwości szkodliwego działania prądu na drewno;
- c) zapewnienie dostatecznego bezpieczeństwa stacjom transformatorowym przed falami wędrownymi wyższego napięcia wskutek wyższego poziomu udarowego linii;
- d) zapewnienie dostatecznego bezpieczeństwa obsługi w przypadku zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej drewna wskutek próchnienia.

Dla spełnienia wymagań wymienionych pod a) należy stosować na poprzeczniki drewno sosnowe należytej jakości, nie używać natomiast drewna świerkowego lub jodłowego, używanego obecnie często na słupy linii. Olej kreozotowy nie wnika bowiem w te gatunki drewna dostatecznie głęboko wskutek odmiennej ich struktury. Drewno jodłowe i świerkowe wymaga odmiennych, osmotycznych metod nasycania nie stosowanych dotychczas u nas szerzej. Ilości oleju kreozotowego wprowadzonego do drewna powinny wynosić 90 zamiast 63 kg/m³, gdyż wtedy dopiero należy spodziewać się całkowitego przesycenia bielu drewna — najmniej trwałej jego warstwy zewnętrznej. Drewno nie powinno być przewiercane i kaleczone, aby uniknąć w ten sposób przenikania spor grzybów do jego wewnętrznych, nie nasyconych warstw.

Wymagania punktu b) sprowadzają się do zapobiegania rozmieleniu i zapaleniu drewna. Rozmielenie polega — jak wiadomo — na odłupywaniu drzazg zewnętrznej powierzchni drewna; wywołane jest to ciśnieniem pary wodnej powstałej z wilgoci zawartej w drewnie pod wpływem prądu udarowego. Rozmielenie nie powoduje na ogół poważniejszych uszkodzeń, wymagających natychmiastowego odłączenia linii,



Rys. 8. Słup przelotowy linii 110-kilowoltowej z poprzecznikiem i nogami drewnianymi

we „Wskazówkach ochrony przepięciowej stacji” wydanych przez Ministerstwo Energetyki.

Wymagania punktu d) dotyczą w znacznej mierze i innych linii elektrycznych. Wypadkom na linii może zapobiec przede wszystkim zastosowanie odpowiednio wyszkolonej obsługi, zaopatrzonej należycie w narzędzia oraz ściśle przestrzeganie przepisów bezpieczeństwa.

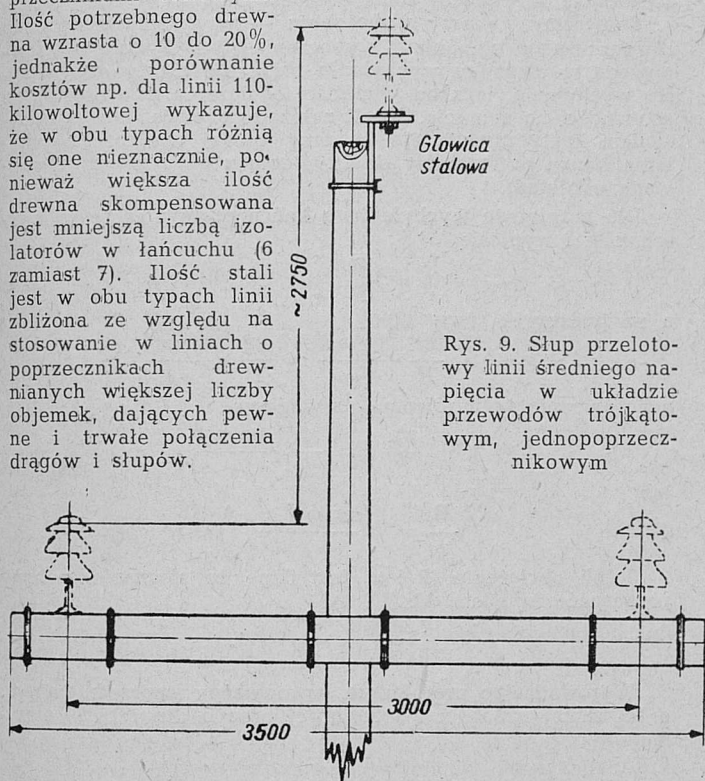
Uwzględniając powyższe zasady zastosowano poza tym połączenia drągów za pomocą objemek zamiast śrub przechodzących na wylot. Objemki takie wykonane są w różnych wymiarach z prętów stalowych nagwintowanych na końcach i spłaszczonych w miejscach zetknięcia z powierzchnią słupa by nie kaleczyć tej powierzchni. Nakrętki na końcach objemek opierają się na podkładkach kulistych pozwalających na dostosowaniu do drągów o różnej średnicy. Objemka typowa wykonywana przez jedną z fabryk krajowych jest pokazana na rys. 7. Zastosowanie objemek pozwala również na znaczne

uproszczenie i skrócenie czasu montażu przez usunięcie kłopotliwego dopasowywania drągów i wiercenia w nich otworów. Usunięto z konstrukcji wszelkiego rodzaju kliny stosując wyłącznie konstrukcje stalowe z ceowników lub kątowników dociskane do drągów za pomocą objemek.

Rys. 8 przedstawia rozwiązanie konstrukcyjne słupa przelotowego linii 110-kilowoltowej o poprzecznikach drewnianych bez przewodów odgromowych.

Słup przelotowy w linii średniego napięcia o typowym dla tych linii układzie trójkątowym, jednopoprzecznikowym przedstawiony jest schematycznie na rys. 9.

Z powyższych rysunków widać, że konstrukcje słupów o poprzecznikach drewnianych są prostsze niż słupy z poprzecznikami stalowymi. Ilość potrzebnego drewna wzrasta o 10 do 20%, jednakże porównanie kosztów np. dla linii 110-kilowoltowej wykazuje, że w obu typach różnią się one nieznacznie, ponieważ większa ilość drewna skompensowana jest mniejszą liczbą izolatorów w łańcuchu (6 zamiast 7). Ilość stali jest w obu typach linii zbliżona ze względu na stosowanie w liniach o poprzecznikach drewnianych większej liczby objemek, dających pewne i trwałe połączenia drągów i słupów.



Rys. 9. Słup przelotowy linii średniego napięcia w układzie przewodów trójkątowym, jednopoprzecznikowym

5. Konserwacja linii z poprzecznikami drewnianymi.

Okres służby obu typów linii — z poprzecznikami metalowymi i drewnianymi — powinien być jednakowy, obliczyć go jednak jest trudno, gdyż zależy on w głównej mierze od należytej konserwacji drewna w czasie eksploatacji. Podawane w literaturze średnie czasy służby linii drewnianych — 20

do 40 lat wykazują znaczne rozbieżności. Pracę linii drewnianych można jednakże przedłużyć znacznie zabezpieczając drewno przed próchnieniem nie tylko przed budową linii, lecz i w czasie jej pracy.

Istnieje wiele metod „uzupełniającego” nasycania drewna — po ustawieniu w linii — metodami osmotyczno-dyfuzyjnymi. Materiał syciwny do tych celów jest wytwarzany w kraju i jest stosunkowo łatwo dostępny. Gdyby konserwacji drewna w liniach elektrycznych za pomocą nasycania uzupełniającego poświęcono choć część tej uwagi, jaką musi poświęcać się ochronie konstrukcji stalowych przed korozją, to niewątpliwie trwałość linii drewnianych byłaby niewiele mniejsza, niż linii stalowych — znacznie kosztowniejszych.

6. Wnioski.

1) Linie o pełnym wyzyskaniu izolacji drewna wykazują znacznie mniej wylądowań w czasie burz niż linie o poprzecznikach stalowych.

2) Ujemne cechy linii drewnianych, jak zbyt szybkie próchnienie, rozmiękanie i zapalenie drewna, mogą być w znacznej mierze usunięte przez odpowiednie nasycanie fabryczne drewna przed budową oraz uzupełnianie — w czasie konserwacji linii, jak również przez odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne.

3) Zalety eksploatacyjne linii o pełnym wyzyskaniu izolacji drewna przemawiają za jak najszerzym stosowaniem ich w nowobudowanych sieciach. Jedynie w okolicach o silnie zanieczyszczonym powietrzu nie zaleca się stosowania takich linii.

4) Zastępowanie drewna jako materiału deficytowego innymi materiałami jak stal i żelbet powinno być stosowane do linii wysokiego napięcia w dalszej kolejności, a to ze względu na wysoką wartość izolacyjną drewna.

5) Istniejące linie średnich napięć na słupach drewnianych z poprzecznikami stalowymi mogą w czasie renowacji stosunkowo łatwo uzyskać większą wytrzymałość udarową przez przerobienie istniejących konstrukcji na bardziej celowe.

LITERATURA

- [1] Jakubowski J. L. Technika wysokich napięć, 1951
- [2] Szpor S. Ochrona odgromowa, t. 1, 1953
- [3] Nowacki P. Linie dalekosiężne, 1953
- [4] Kostienko N. W. Atmosferyjne pierienapięzenia i grozozaszczyta wysokowoltowych ustanowok, 1949
- [5] Burgdorf W. W. Isliedowanie grozozaszczyty linii elektropieriedaczy
- [6] Burgdorf W. W. Grozozaszczyta wozdusznych linii elektropieriedaczy, 1952
- [7] Kowańko J. K. Tipowyje dieriewiannyje opory dla linii elektropieriedaczy 35 i 110 kV, 1952
- [8] Weidler G. Wirtschaftliche Bauweise von Mittelspannungsleitungen (El. Wirtschaft, 1953, 13)
- [9] Pauli O. Impregnierung und Nachpflege bei Holzmasten (El. Wirtschaft, 1953, 13)
- [10] Gewecke H. Impregnierung von Masten aus Fichtenholz (El. Wirtschaft, 1952, 13)
- [11] Dutkin G. S., Liberman A. J. Sooruzhenie i eksploatacja vysokowoltowych linii elektropieriedaczy, 1946
- [12] Dolginow A. L. Grozozaszczyta elektriczeskich ustanowok, 1954

MGR INŻ. LESZEK MARTINI

Kraty wielokrotne*)

621.3.045.001.11

Treść. Praca obejmuje stateczność konstrukcji kratowych, złożonych z płaskich kratownic wielokrotnych, dających duże oszczędności materiału. Rozważania dotyczą współpracy prętów ściskanych, narażonych na wyboczenie, z prętami rozciągającymi tej samej kraty płaskiej. Udowodniono, że dla płaskich kratownic wielokrotnych, obciążonych antymetrycznie, za eulerowską długość wyboczeniową ukośników należy uważać odległość dwóch sąsiednich węzłów płaskich. Podano sposób rozwiązania płaskiej kraty wielokrotnej przy pomocy wieloboku Cremony w wypadku obciążenia antymetrycznych, przy wprowadzeniu numeracji pól na planie sił.

1. Uwagi ogólne.

Zasadniczymi częściami belek, słupów, wież i iglic kratowych są krawężniki (pasy) oraz okratowanie wypełniające (ukośniki, słupki, pręty zerowe, stężenia przestrzenne). Pierwsze mają za zadanie przenieść moment zginający i siły podłużne, drugie — siłę poprzeczną oraz moment skręcający.

Ze względu na zmniejszenie sił osiowych w krawężnikach — przy tym samym zewnętrznym momencie zginającym — zaleca się jak największe ich oddalenie. To samo wymagać jest ze względu na sztywność konstrukcji. Zwiększenie odległości krawężników powoduje znaczny przyrost smukłości ukośników. W dotychczasowych konstrukcjach zapobiega się temu przez wprowadzenie prętów zerowych w płaszczyznach ścian oraz stężeń czyli prętów zerowych prze-

strzennych. Z tego powodu konstrukcje takie wypadają dość ciężkie.

Okratowanie wielokrotne ma tę zaletę, że nawet przy dużym rozstawie krawężników nie zawiera żadnych prętów zerowych ani stężeń przestrzennych i odznacza się małymi, zredukowanymi długościami ukośników i krawężników. Okratowanie wielokrotne polega na przeprowadzeniu w każdej ścianie dwóch przecinających się pęków prętów równoległych, nachylonych pod tym samym kątem względem osi konstrukcji (np. 45°).

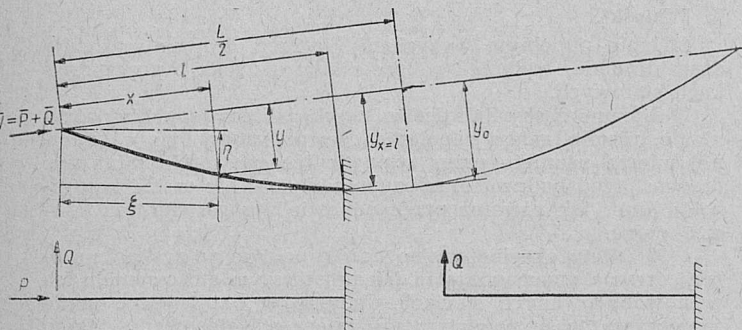
Należy podkreślić, że okratowanie wypełniające każdą ścianę konstrukcji jest obciążone antymetrycznie**), przy na ogół występujących rodzajach pracy konstrukcji. Dotyczy to też iglicy kratowej pracującej na wyboczenie, gdyż w tym

*) Projekty spawanych konstrukcji wsporczych dla linii wysokonapięciowych wykonano na podstawie niniejszej pracy pod kierownictwem autora w biurze Energoprojektu w Krakowie.

**) Obciążenie nazywamy antymetrycznym (antysymetrycznym) wtedy, kiedy siły działające z jednej strony osi symetrii kraty różnią się od lustrzanego odbicia sił po drugiej stronie osi jedynie zwrotem.

wypadku okratowanie wypełniające poszczególne ściany musi mieć pewną sztywność przeciw przesunięciu poprzecznemu. (Przesunięcie poprzeczne występuje w wypadku obciążenia antymetrycznego). Ewentualne lokalne składowe obciążenie symetryczne (wywołane np. jednostronną siłą skupioną) może być przeniesione przy pomocy dodatkowego steżenia, gwarantującego równomierne obciążenie całej konstrukcji.

W wypadku kraty n -krotnej obciążenie antymetryczne wywoła w jednym pęku prętów równoległych siły ściskające, w drugim rozciągające. Wskutek tego każdy pręt ściskany będzie się krzyżował z $n-1$ prętami rozciąganymi, dzielącymi go na n równych części (dla pasów równoległych). Oddziały-



Rys. 1

Rys. 2

wanie prętów rozciąganych na pręty ściskane, narażone na wyboczenie, będzie przeciwdziałało wyboczeniu w kierunku prostopadłym do płaszczyzny kraty. Treścią niniejszej pracy jest wykazanie, iż oddziaływanie to jest tak silne, że punkty krzyżowania się ukośników ściskanych z rozciąganymi można uważać za węzły przestrzenne o charakterze stałym (nieprzesuwalnym).

2. Wprowadzenie zasadniczych wzorów teoretycznych.

Pręt jednym końcem utwierdzony, obciążony na drugim końcu stałą siłą poprzeczną Q oraz stałą siłą P osiowo ściskającą (rys. 1). Zakładamy, że moment zginający $P \cdot \eta$ siły podłużnej jest tego samego rzędu co moment $Q \cdot \xi$ siły poprzecznej. Jedynie w tym wypadku obie siły mogą mieć równocześnie wpływ na linię wygięcia pręta. Zakładamy też, że rzędne linii wygięcia η są małe w porównaniu z ich odciętymi ξ . Z tych dwóch założeń wynika, że siła Q jest w porównaniu z siłą P mała oraz że kąt pomiędzy wypadkową W a pierwotną osią pręta jest mały.

Weźmy pod uwagę wzór Eulera

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2},$$

gdzie P_E jest wartością Eulera, L swobodną długością eulrowską pręta, EI zaś jego sztywnością. Wzór ten możemy zastosować również do naszego wypadku. Siła Eulera P_E będzie wtedy równa sile W . Ze względu na to, że siła wypadkowa W niewiele różni się od siły ściskającej P , możemy siłę P uważać za siłę Eulera:

$$P_E = P.$$

Robiąc pewne przekształcenie wzoru Eulera wprowadźmy oznaczenie:

$$\omega = \frac{\pi}{L} = \sqrt{\frac{P}{EI}}.$$

Przy powyższym oznaczeniu równanie linii wygięcia pręta wyboczonego będzie następujące:

$$(1) \quad y = y_0 \sin \omega x.$$

y_0 wyznaczamy z warunku, że tangens (y') kąta, który tworzy styczna do sinusoidy (linii wygięcia pręta) z kierunkiem wypadkowej W w miejscu $x = l$ równa się $\frac{Q}{P}$ czyli

$$y'_{x=l} = y_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega l = \frac{Q}{P}; \quad \text{stąd} \quad y_0 = \frac{Q}{P \omega \cos \omega l};$$

z równania (1) mamy:

$$(2) \quad y_{x=l} = y_0 \sin \omega l = \frac{Q \operatorname{tg} \omega l}{P \omega}.$$

Stateczność pręta sprężystego przy różnorodnych obciążeniach wybo-
c z a j ą c y c h. Należy zaznaczyć, że za jeden z typowych wypadków wyboczenia uważamy obciążenie siłą poprzeczną Q , która jest proporcjonalna do przemieszczenia η mierzonego pod tą siłą, czyli $Q = \kappa \eta$, gdzie κ jest współczynnikiem proporcjonalności (rys. 2).

Założmy, że nasz pręt jest obciążony dwiema siłami P i Q , gdzie $Q = \kappa \eta$ (rys. 3). Przyjmijmy za η przemieszczenie wolnego końca dowolnie wychylonego pręta. Wtedy działa na niego, oprócz siły podłużnej P , siła poprzeczna $Q = \kappa \eta$ zwiększająca wychylenie η . Możemy znowu tak obciążony pręt zastąpić równoważnym prętem Eulera o długości L i o sile ściskającej R , będącej sumą geometryczną $P + Q$.

Zauważmy, że przy wyboczeniu — w przeciwieństwie do równoczesnego zginania i wyboczenia (P i Q stałe) — równowaga w wypadku wychylenia pręta nie zależy od wielkości wychylenia, lecz od wielkości obciążenia w stosunku do sztywności na zginanie. Jeżeli założone obciążenie jest obciążeniem krytycznym pręta, to przy każdej wielkości wychylenia końca pręta mamy do czynienia z równowagą (równowaga obojętna).

Dla przyjętego wychylenia η końca pręta ugięcie w miejscu $x = l$ wyniesie

$$y_{x=l} = \eta + \frac{\kappa \eta}{P} l \quad (h \approx \eta).$$

a na podstawie równ. (2):

$$y_{x=l} = \frac{Q}{P} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega l}{\omega} = \frac{\kappa \eta}{P} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega l}{\omega};$$

z porównania tych równań otrzymamy:

$$\eta + \frac{\kappa \eta}{P} l = \frac{\kappa \eta}{P} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega l}{\omega}$$

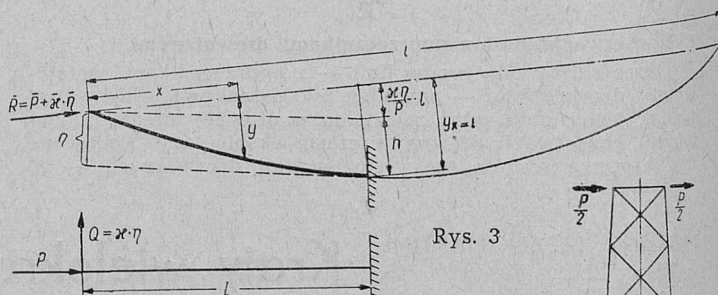
lub

$$(3) \quad \frac{P}{\kappa} = l \left(\frac{\operatorname{tg} \omega l}{\omega l} - 1 \right).$$

Jeżeli obciążenie (P i κ) jest dane, to równanie możemy rozwiązać względem ωl :

$$(4) \quad \frac{\operatorname{tg} \omega l}{\omega l} = \frac{P}{\kappa l} + 1.$$

Wprowadzając pręt Eulera równoważny poprzedniemu, tj. o tej samej nośności i sztywności oraz o długości L , otrzymujemy:



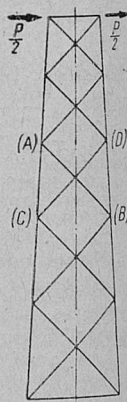
Rys. 3

$$(5) \quad \omega = \frac{\pi}{L} \quad \text{lub} \quad L = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi l}{\omega l}.$$

3. Obliczenie długości zredukowanej pręta ściskanego, który krzyżuje się w połowie swej długości z identycznym prętem, rozciągany siłą tej samej wielkości.

Taki przypadek występuje w okratowaniu dwukrotnym (rys. 4). Oznaczmy długości obu prętów przez $2a$ (rys. 5). Pręt ściskany AB , o swobodnej długości $2a$, mógłby ulec wyboczeniu jedynie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny kraty. Jest on jednak do pewnego stopnia podpierany prętem rozciągany CD w miejscu połączenia. Oddziaływanie to pochodzi od sztywności na zginanie pręta CD oraz od wypadkowej sił rozciągających.

W celu uproszczenia zagadnienia przyjmijmy, że pręt rozciągany zawiera przegub w miejscu skrzyżowania (rys. 6). Założenie to jest mniej korzystne niż warunki rzeczywiste, gdyż nie uwzględnia sztywności zginania pręta rozciąganego. Zajmijmy się prętem ściskany AB (rys. 7). Założmy, że siła P jest siłą Eulera powodującą wyboczenie. Siłę, z którą



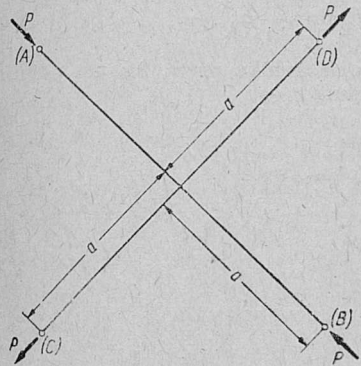
Rys. 4

pręt rozciągany działa na pręt ściskany, oznaczmy przez Q ; jej wielkość zależną od strzałki ugięcia f możemy obliczyć, biorąc pod uwagę pręt rozciągany CD . Ze względu na przegub obie części pręta rozciąganego będą odcinkami prostymi, przy czym przegub przesunie się na odległość f równą strzałce ugięcia pręta ściskanego (rys. 8). Z warunku

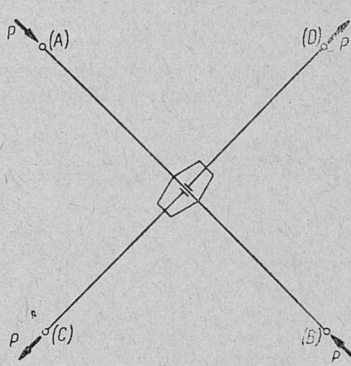
jest równe strzałce ugięcia pręta AB pod siłą Q (rys. 9). Nasz przekształcony pręt AB otrzyma postać jak na rys. 11.

Wielkość x znajdziemy znając

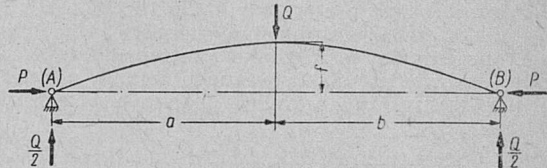
$$Q = \frac{2Pf}{a}, \text{ czyli } x = -\frac{P}{a}.$$



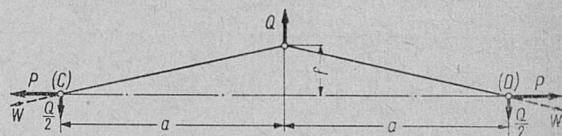
Rys. 5



Rys. 6



Rys. 7



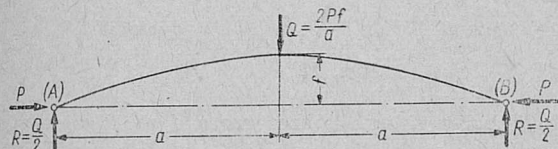
Rys. 8

równowagi sił oraz podobieństwa odpowiednich trójkątów otrzymamy:

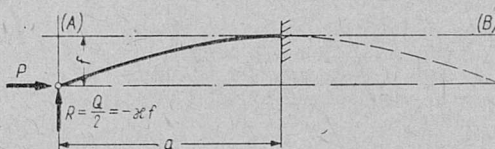
$$\frac{Q}{2} : P = f : a, \text{ skąd } Q = \frac{2Pf}{a}.$$

Wstawiając otrzymaną wielkość x i P do równ. (4) oraz kładąc $l = a$ otrzymamy:

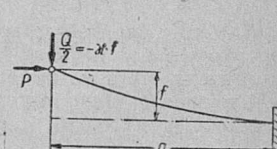
$$\frac{\operatorname{tg} \omega a}{\omega a} = 0.$$



Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11

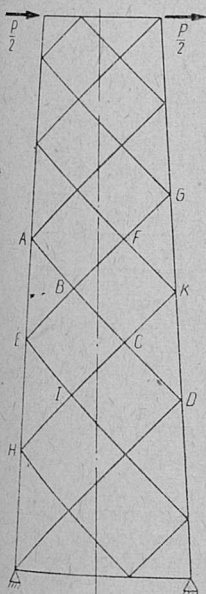
Obliczywszy Q możemy przejść znowu do rozpatrzenia pręta ściskanego AB i wyznaczyć reakcje poprzeczne R na jego końcach (rys. 9):

$$R = \frac{Q}{2}.$$

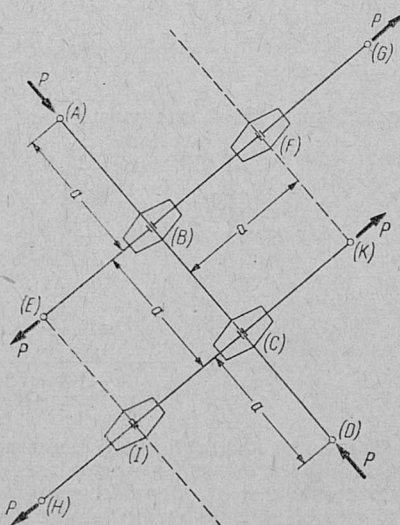
Powyższy pręt ściskany, obciążony siłami P , Q i R , możemy uważać za utwierdzony na środku, rozważymy więc tylko

Równanie to może służyć do wyznaczenia wielkości ωa . Jego pierwiastkami są: $\omega a = \pm n\pi$, gdzie $n = 1, 2, 3, \dots$. Sens będą miały jedynie rozwiązania dodatnie. Długość zastępczego pręta eulerowskiego, tj. o tej samej nośności (siłę Eulera) i sztywności na zginanie, otrzymamy ze wzoru (5):

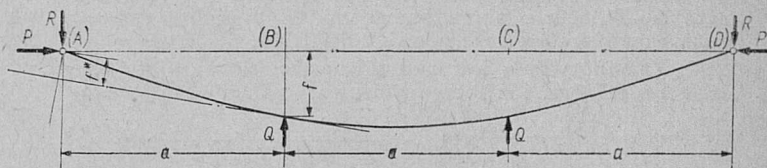
$$L = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi a}{\omega a}.$$



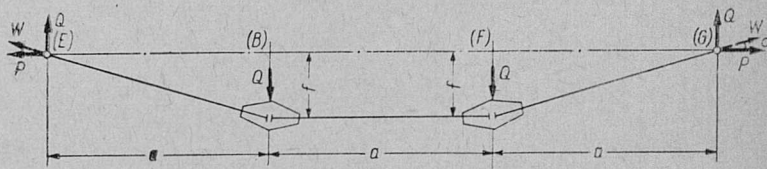
Rys. 12



Rys. 13



Rys. 14



Rys. 15

Największą długość eulerowską otrzymamy dla najmniejszego $\omega a = \pi$, czyli

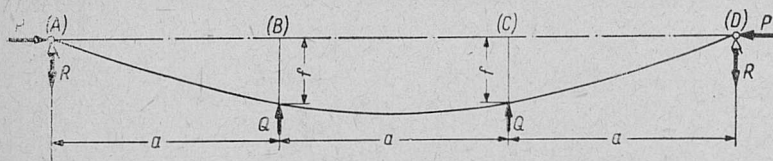
$$L = a.$$

Z tego rozwiązania wynika, że nawet przy przyjęciu bardziej niekorzystnego warunku, jakim jest odrzucenie sztywności na zginanie pręta rozciągającego, długość zredukowana pręta ściskanego krzyżującego się w połowie swej długości z analogicznym prętem rozciągającym, jest równa połowie długości pręta ściskanego. Punkt skrzyżowania obu prętów możemy zatem uważać za nieruchomy węzeł kraty przestrzennej nawet w wypadku pominięcia sztywności zginania pręta rozciągającego. Oczywiście, jeżeli w rzeczywistości występuje ta sztywność, punkty skrzyżowania tym bardziej możemy uważać za węzły nieprzesuwalne.

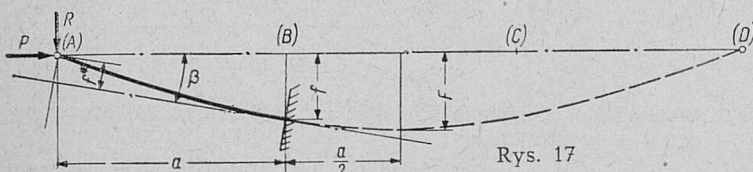
jego połowę (rys. 10). Siłę R można przedstawić jako iloczyn $R = -xf$, przy czym znak ujemny przy x oznacza, że kierunek siły R jest przeciwny do kierunku przemieszczenia f końca pręta A (por. rozdz. 2). Należy zaznaczyć, że przemieszczenie wolnego końca A nowootrymanego pręta (rys. 10)

4. Obliczenie długości zredukowanej pręta ściskanego, krzyżującego się w 1/3 i 2/3 swojej długości z dwoma identycznymi prętami, rozciągany siłą tej samej wielkości.

Założmy, że pręty rozciągane są tej samej długości co ściskane i krzyżują się ze ściskanymi też w 1/3 i 2/3 swojej długości. Widzimy to w kracie trójkrotnej (rys. 12). Oznaczmy długość każdego z prętów AD, EG i HK przez $3a$ (rys. 13). Pręt ściskany AD, o swobodnej długości $3a$, mógłby ulec wyboczeniu jedynie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny kraty. Jest on jednak do pewnego stopnia podpierany prętami rozciągającymi EG i HK w miejscach połączeń. Oddziały-



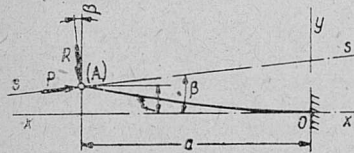
Rys. 16



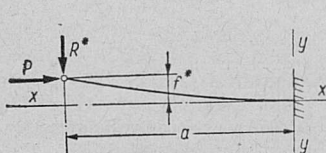
Rys. 17

wanie to jest wynikiem sztywności na zginanie prętów EG i HK oraz działania wypadkowych sił rozciągających.

Założmy, że pręty rozciągane mają przeguby w miejscach skrzyżowania z prętami ściskanymi (rys. 13 i 15). Założenie to stwarza warunki mniej korzystne od rzeczywistych, gdyż w ten sposób pomijamy wpływ sztywności na zginanie prętów rozciąganych.



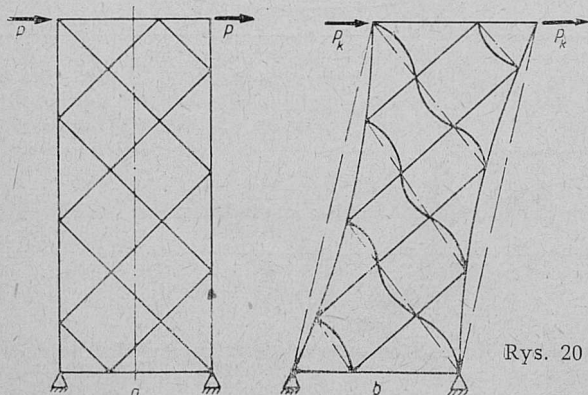
Rys. 18



Rys. 19

Zakładając, że siła ściskająca osiągnęła wartość Eulera, rozpatrzmy wyboczony pręt AD (rys. 14). Pręt ten poza siłą ściskającą P będzie obciążony siłami Q , pochodzącymi od wychylonych prętów rozciąganych EG i HK.

Siłę Q obliczymy z warunku równowagi sił dla pręta rozciąganego EG (rys. 15). Biorąc pod uwagę składowe wypadko-



Rys. 20

wej siły rozciągającej W , przy uwzględnieniu podobieństwa trójkątów, otrzymamy:

$$\frac{Q}{P} = \frac{f}{a} \quad \text{czyli} \quad Q = P \frac{f}{a}.$$

Wracając do pręta ściskanego (rys. 16) możemy wyznaczyć reakcje poprzeczne na jego końcach wynikłe od działania sił Q . Otrzymujemy $R = Q$.

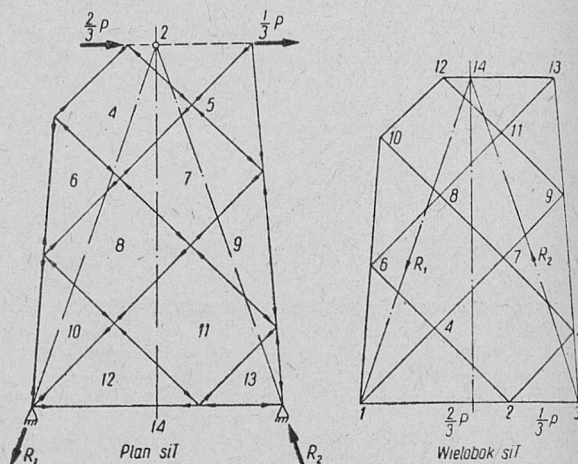
Część AB pręta ściskanego możemy przedstawić jako pręt utwierdzony na końcu B ze swobodnym końcem A, obciążonym siłami P i R (rys. 17).

Jeżeli przyjmiemy, że kształt linii wygięcia pręta AD jest sinusoidalny, możemy z łatwością obliczyć kąt β , który tworzy styczna do tej krzywej, w 1/3 długości pręta, z osią pierwotną pręta, oraz przemieszczenie f^* końca A względem tej stycznej.

Równanie linii wygięcia osi pręta (sinusoidy) jest:

$$y = F \sin \frac{\pi}{3a} x,$$

gdzie F jest strzałką ugięcia na środku pręta, $3a$ jest połową fali i równa się długości pręta.



Rys. 21

Wielkość F możemy określić ze wzoru $f = F \sin \frac{\pi}{3}$;

wtedy

$$y = \frac{f}{\sin \frac{\pi}{3}} \sin \frac{\pi}{3a} x.$$

Pochodna y' będzie

$$(6) \quad y' = \frac{f \pi}{3a \sin \frac{\pi}{3}} \cos \frac{\pi}{3a} \cdot x.$$

Kąt β mierzony łukiem otrzymamy, gdy do wzoru (6) za x wstawimy a :

$$(7) \quad \beta = y'_{x=a} = \frac{f \pi}{3a} \cdot \frac{\cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3}}.$$

Jest to kąt mały. Stąd otrzymamy

$$(8) \quad f^* = f - a\beta = f \left(1 - \frac{\pi}{3} \frac{\cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3}} \right) = f \frac{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3}},$$

skąd

$$(9) \quad f = f^* \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}.$$

Wzór (9) pozwoli nam obliczyć przemieszczenia wolnego końca pręta AB jednostronnie utwierdzonego, gdy znane jest przemieszczenie f w 1/3 długości pręta wolnopodpartego AD przy założeniu, że linia wygięcia jest sinusoida.

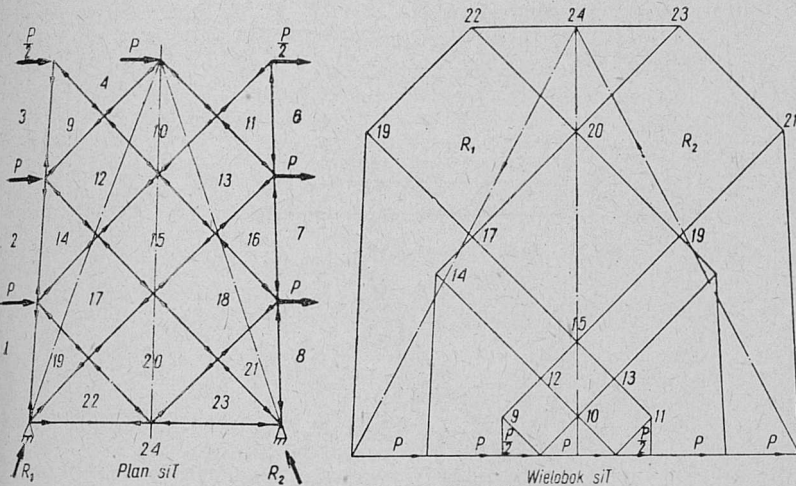
Kąt β też możemy wyrazić w funkcji f^* :

$$\beta = \frac{f \pi}{3a} \cdot \frac{\cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3}} = \frac{f^* \pi}{3a} \cdot \frac{\cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}.$$

Część AB pręta ściskanego można przedstawić jak na rys. 18,

gdzie

$$R = Q = P \frac{f}{a} = P \frac{f^*}{a} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}$$

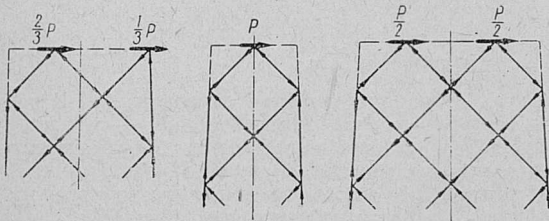


Rys. 22

oraz

$$\beta = \frac{f^* \pi}{3a} \cdot \frac{\cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}$$

Składową P w kierunku $s-s$ oraz R w kierunku prostopadłym do poprzedniego zamienimy na składowe w kierunkach

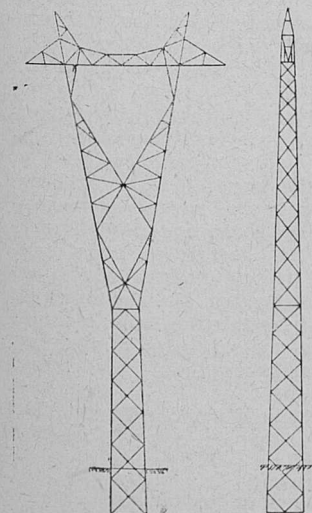


Rys. 23

$x-x$ i $y-y$ przez rzucenie P i R na te kierunki. Ponieważ składowa R jest mała w stosunku do P , przeto rzut R na kierunek $x-x$ przy założeniu, że kąt β jest mały, możemy pominąć w stosunku do rzutu P na $x-x$ (por. rozdz. 2). Otrzymamy wtedy układ jak na rys. 19.

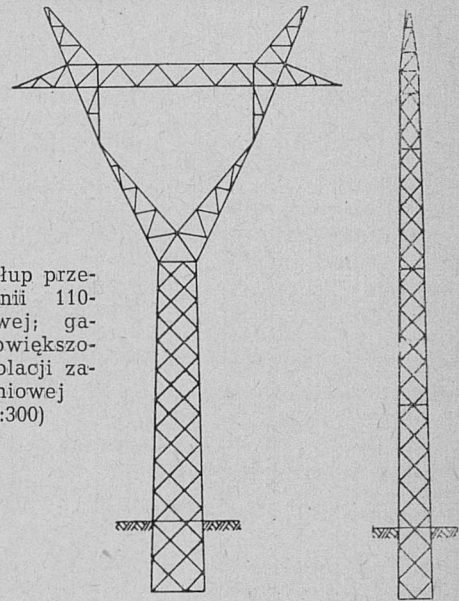
Ponieważ β jest mały, tzn. $\sin \beta \cong \beta$ i $\cos \beta \cong 1$, przeto otrzymamy:

$$\begin{aligned} R^* &= R - P \sin \beta = R - P \beta = \\ &= P \frac{f^*}{a} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}} - \frac{\frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}} \right) = \\ &= P \frac{f^*}{a} \frac{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{3}} = \\ &= P \frac{f^*}{a} = -\kappa^* f^*, \end{aligned}$$



Rys. 24. Słup przelotowy linii 110-kilowoltowej (~ 1:300)

gdzie $\kappa^* = -\frac{P}{a}$. Znak minus przy κ^* oznacza, że ze wzrostem przemieszczenia f^* siła R^* wzrasta, przy czym jest tak skierowana, że przeciwdziała przemieszczeniu f^* (kierunek jest



Rys. 25. Słup przelotowy linii 110-kilowoltowej; gabaryt powiększony dla izolacji zabrudzeniowej (~ 1:300)

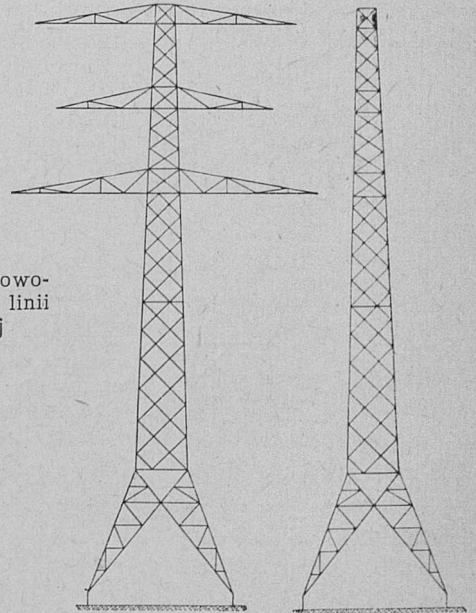
przeciwny do założonego w rozdz. 2). Znając długość a pręta oraz wielkość κ^* w funkcji siły P , możemy wprowadzić je do wzoru (4). Otrzymamy wtedy

$$\frac{\operatorname{tg} \omega a}{a} = \frac{P}{\kappa^* a} + 1 \quad \text{czyli} \quad \frac{\operatorname{tg} \omega a}{\omega a} = 0.$$

Najmniejszym dodatnim rozwiązaniem tego równania jest $\omega a = \pi$. Wprowadzając to do wzoru (5) otrzymamy długość zredukowaną pręta ściskanego

$$L = \frac{\pi a}{\omega a} = \frac{\pi a}{\pi} = a.$$

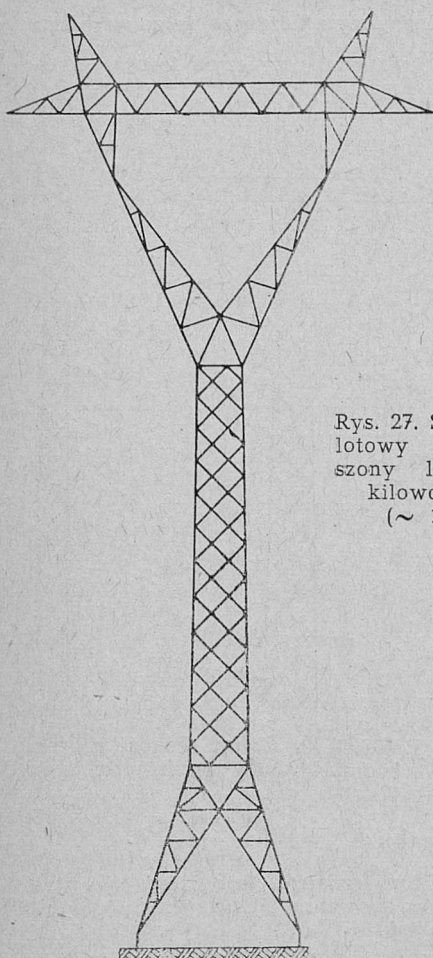
Wynika stąd, że nawet przy pominięciu sztywności na zginanie prętów rozciąganych okratowania wielokrotnego (przez założenie przegubów) długość zredukowana ukośników bę-



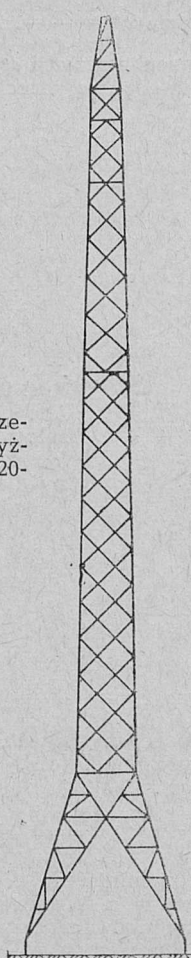
Rys. 26. Słup odporowo-narozny dwutorowej linii 110-kilowoltowej (~ 1:300)

dzie równa odległości dwóch sąsiednich miejsc skrzyżowania prętów. Innymi słowy punkty skrzyżowania prętów możemy uważać za nieruchome węzły kratownicy przestrzennej. Oczywiście, w rzeczywistości — przy uwzględnieniu sztywności zginania prętów rozciąganych — węzły te tym bardziej możemy uważać za nieprzesuwalne.

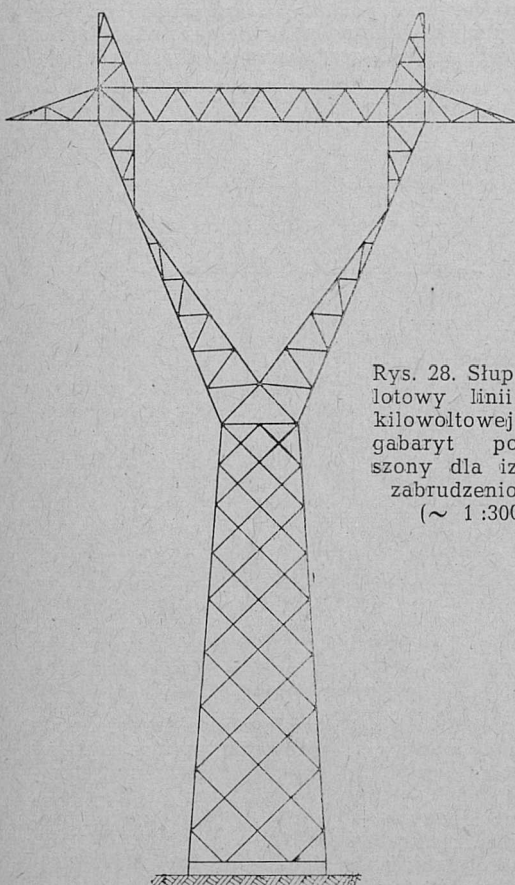
Krata przed utratą stateczności podana na rys. 20a wyglądałaby po utracie stateczności jak na rys. 20b.



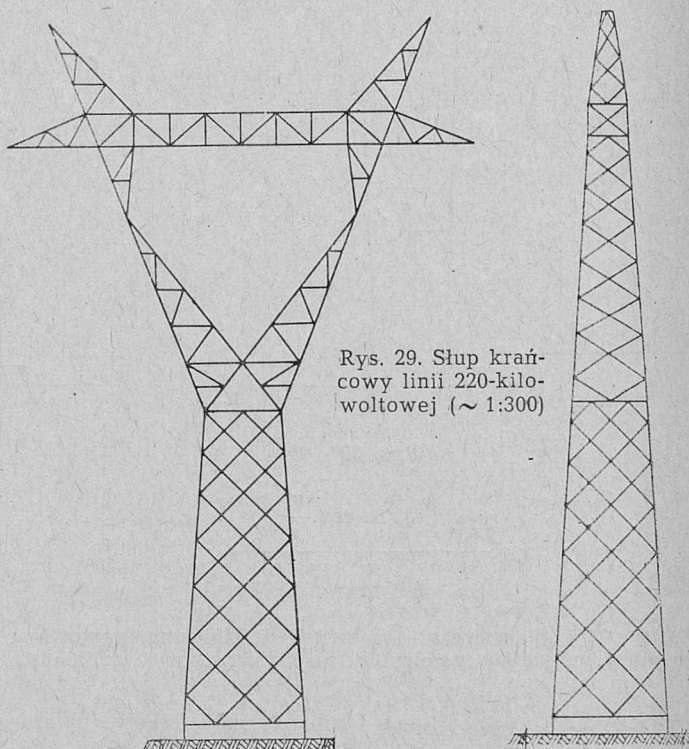
Rys. 27. Słup przełotowy podwyższony linii 220-kilowoltowej (~ 1:300)



Rys. 28. Słup przełotowy linii 220-kilowoltowej — gabaryt powiększony dla izolacji zabrudzeniowej (~ 1:300)



Rys. 29. Słup krańcowy linii 220-kilowoltowej (~ 1:300)



5. Przykłady wykreślenia wieloboku Cremony dla kraty trójkrotnej i czterokrotnej przy wprowadzeniu numeracji pól ograniczonych siłami wewnętrznymi i zewnętrznymi na planie sił.

Dla kraty trójkrotnej (rys. 21) zadanie powyższe będzie, ściśle rzecz biorąc, jednoznaczne przy założeniu udziału sił wewnętrznych w prętach 12—14 i 14—13, których suma jest równa wypadkowej sił 11—12 i 11—13. Od stosunku tych sił (12—14 i 14—13) zależy położenie punktu przecięcia się reakcji R_1 i R_2 .

Na rys. 22 podano przykład wyznaczenia sił wewnętrznych — przy pomocy wieloboku Cremony — w prętach kraty czterokrotnej w założeniu obciążenia antymetrycznego. Takie obciążenie ma powstać w wyniku parcia wiatru. Należy zwrócić uwagę, że różnice w siłach wewnętrznych prętów krzyżujących się są w praktyce bardzo małe ze względu na występujące równocześnie obciążenie od siły skupionej, odgrywającej dominującą rolę.

6. Zalety okratowania wielokrotnego.

1) Mała smukłość ukośników (długość swobodna ukośników równa odległości dwu sąsiednich punktów skrzyżowania).

2) Mała smukłość prętów krawężnika.

3) Jednakowe siły wewnętrzne we wszystkich odpowiednich prętach okratowania wielokrotnego, aż do chwili przekroczenia siły krytycznej w prętach ściskanych (rys. 20).

4) Brak prętów zerowych oraz stężeń, stosowanych w celu zmniejszenia smukłości prętów.

5) Możliwość rozwiązania kraty, obciążonej antymetrycznie, jako statycznie wyznaczalnej, przy zastosowaniu wieloboku Cremony (z pominięciem naprężeń wtórnych).

6) Przy projektowaniu siatki statycznej można zakończyć okratowanie wielokrotne — przez poprowadzenie zamykającego pręta poziomego — na wysokości któregośkolwiek punktu skrzyżowania ukośników (rys. 23). Jest to możliwe dlatego, że wypadkowa dwóch sił — od przeciętnych w jednym węźle ukośników — przy założeniu równych sił wewnętrznych w tych prętach (co do wartości bezwzględnej) ma kierunek poziomy i może być przejęta przez poziomy pręt zamykający.

7) Łatwość rozwiązania konstrukcyjnego powyższego okratowania.

Na rysunkach od 24 do 29 włącznie podano sylwetki kilku typowych słupów linii wysokich napięć z zastosowaniem okratowań wielokrotnych.

LITERATURA

- [1] G i r k m a n n K. Die Hochspannungs-Freileitungen, 1946
- [2] H u b e r M. T. Stereomechanika techniczna, 1951
- [3] M a y z e l B. Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Podręczn. Inżyniera-Elektryka, t. II, 1949

MGR INŻ. A. PRZYŁUSKI,
DOC. Z. SKOCZYŃSKI

Zakład Wielkich Moc Instytutu
Elektrotechniki

W sprawie schematów zastępczych sieci bier- nych o n zaciskach*)

Celem naszej pracy z 1952 r. (PE, zes. 10, str. 421—425) było, jak to wynika z samego tytułu naszego artykułu, wykazanie możliwości zastąpienia dowolnej *niejednorodnej* sieci czynnej o n zaciskach najprostszym układem zastępczym, który przybiera postać wieloboku zupełnego, zawierającego w poszczególnych gałęziach siły elektromotoryczne. W zastosowaniu do obliczeń zwarciovych zwróciliśmy jedynie uwagę na to, że korzystając z wniosków, wynikających z udowodnionej ogólnej zasady Thévenina, można zastąpić sieć elektryczną prostym układem zastępczym bez potrzeby jej modelowania, jeżeli tylko będą znane pewne — sprecyzowane w naszej pracy — warunki

w schemacie zastępczym biernej sieci uproszczonej. Ten niesłuszny wniosek skłonił autorów do poszukiwania bardziej prostych metod rozwiązywania zagadnienia. Jednak podanemu przez autorów „praktycznemu sposobowi wyznaczania układów zastępczych” nie można przyznać cech praktycznej przydatności.

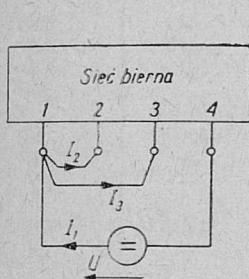
Jak wiadomo, każdą sieć bierną o n zaciskach można zastąpić wielobokiem zupełnym o n wierzchołkach. Na rys. 1 i 2 podano dla przykładu sieć oraz jej układ równoważny przy $n = 4$. Sposób bezpośredniego pomiaru poszczególnych oporności występujących w układzie zastępczym (rys. 2) podano na rys. 1. A więc

$$(1) \quad X_{34} = \frac{U}{I_3}; \quad X_{24} = \frac{U}{I_2}; \quad X_{14} = \frac{U}{I_1 - (I_2 + I_3)}.$$

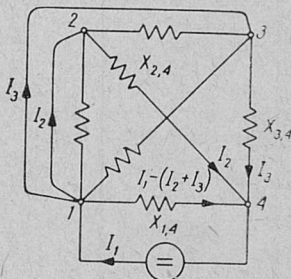
Pozostałe oporności wyznacza się drogą analogicznych pomiarów przy zwarciu innych zacisków.

Podana zasada jest zupełnie ogólna i „uniwersalna” w odniesieniu do *niejednorodnych* sieci biernych o dowolnej liczbie zacisków zewnętrznych, a warunek bierności sieci jest jedynym ograniczeniem. Natomiast metoda autorów nie jest „uniwersalna” nawet z uwagi na liczbę n zacisków ($n \leq 4$) i jest o wiele mniej poręczna, jak wykazuje porównanie wzorów (1) z sześciu wierszami wzorów podanych przez autorów (PE, 1954, z. 7, str. 307, prawy łam). Korzystanie z metody autorów byłoby świadomą i nieuzasadnioną rezygnacją z możliwości dużego uproszczenia i ułatwienia obliczenia, które daje analizator.

Metoda autorów może wprowadzić czytelnika w błąd, gdyż przedstawia w fałszywym świetle zagadnienie wyznaczania oporności wieloboku zastępczego sieci biernej o n zaciskach zewnętrznych zarówno metodą ogólną, jak i analizatorową. Ponadto w przypadku sieci biernej o $n = 3$ zaciskach zewnętrznych autorzy zasugerowali błędną analogią transformatorową stwierdzając, że jedna z oporności gwiazdy może być ujemna, jak w transformatorze trójfazowym. Jest to, oczywiście, niemożliwe, albowiem przekształcenie trójkąta (o opornościach indukcyjnych), który jest naturalnym schematem zastępczym układu w przypadku $n = 3$, nie może prowadzić do gwiazdy o ujemnej oporności ramienia. Gwiazda zastępcza transformatora nie jest wynikiem przekształcenia trójkąta, a zatem mogą wystąpić — z innych zupełnie przyczyn — oporności ujemne, których modelowanie na analizatorze jest bardzo żmudne.



Rys. 1. Pomiar
i układ rzeczywisty



Rys. 2.
Układ wyjaśniający

zwarciove w punktach powiązania dwóch części badanego układu (p. 6 naszej pracy). Nie zajmowaliśmy się w swej pracy ani zagadnieniem najprostszego schematu zastępczego *jednorodnej* sieci biernej o n zaciskach zewnętrznych, ani metodą analizatorowego wyznaczania parametrów tego schematu dla sieci z modelowaną, któremu to zagadnieniu jest poświęcony artykuł mgrów A. Lergtopera i O. Reicha. Jak widać, tematyka obu prac jest zasadniczo różna. Nie dostrzegając tej różnicy autorzy wyciągnęli w związku z naszą pracą niesłuszny wniosek o konieczności rozwiązania układu kilku równań i to wyższych stopni celem określenia oporności występujących

*) Uwagi i wyjaśnienia do artykułu mgrów A. Lergtopera i O. Reicha pt. Schematy zastępcze części układów energetycznych do obliczania prądów zwarciovych na analizatorze prądu stałego (PE, 1954, z. 7, str. 306).

Sprawozdanie z działalności oddziałów SEP w 1954 roku

Wykonanie planu pracy oddziałów SEP analizowane jest na podstawie sprawozdań kwartalnych. Zestawienie wyników działalności za pierwsze półrocze 1954 r. zamieszczone było w zes. 10, a za trzeci kwartał w zes. 12 Przeglądu Elektrotechnicznego. Sprawozdania za IV kwartał, które miały stanowić łącznie z poprzednimi materiały do zestawienia wyników za cały rok 1954, otrzymano, niestety, od wielu oddziałów z dużym opóźnieniem, bo dopiero na dzień 8 lutego 1955 r. wpłynęły sprawozdania ze wszystkich oddziałów z wyjątkiem Oddziału Koszalińskiego, który w ogóle tylko raz w ciągu roku wypełnił swój obowiązek sprawozdawczy (w III kwartale), a na który przypada ~ 0,7% ogólnej liczby członków Stowarzyszenia. Mamy więc liczby dość wiarogodne; byłyby one jeszcze pewniejsze, gdyby poszczególne sprawozdania zawierały mniej błędów i luk w odpowiedziach.

Wyniki za IV kwartał i łącznie za cały rok 1955 zestawiono w tablicy I. Widać z nich, że działalność naszego Stowarzyszenia na ogół znacznie przekroczyła zaplanowane ramy.

Zanalizujemy niektóre pozycje tego zestawienia.

a) Liczba członków wzrosła w ciągu roku o 23%, osiągając ok. 12,5 tysiąca. Przyrost procentowy jest mniejszy niż w roku poprzednim, lecz większy od spodziewanego. Na zmniejszenie przyrostu wpłynęło w pewnym stopniu skreślanie członków nie płacących składek od dawna i nieaktywnych. Te skreślenia spowodowały, że w niektórych oddziałach stan liczbowy członków w końcu roku był mniejszy niż na początku (Bydgoszcz, Jelenia Góra, Olsztyn, Wrocław). Pomyślny objaw obserwujemy w oddziałach, które oczyściły swój skład członkowski w początku roku, później jednak rozwinęły ożywioną działalność, dzięki czemu nie tylko wyrównały

ubytek, ale osiągnęły na koniec roku znaczny przyrost (np. Oddział Zagłębia Węglowego: 845—693—1081 członków).

b) Koła Zakładowe wykazują silny rozwój ilościowy. Liczba ich wzrosła półtorakrotnie. Do kół tych należy 75% członków SEP, czyli tylko co czwarty członek nie ma koła SEP w swoim zakładzie pracy.

c) W zakresie liczby odczytów, konferencji, narad, wystaw i opieki nad bibliotekami plan został wypełniony lub o kilkanaście albo kilkadziesiąt procentów przekroczony. Rozkład rocznej liczby odczytów na poszczególne kwartały przedstawia się jak następuje: 19,2% + 23% + 25,8% + 32% = 100%. Przeczy to panującym u wielu kolegów poglądom, że działalność odczytowa w okresie lata rzekomo zamierała. Plan odczytów niektóre oddziały wykonały z wielką nadwyżką (Kraków 210%, Zagłębie 174%, Warszawa 150%), natomiast 4 oddziały zostały daleko w tyle za planem. Są to oddziały: Łączności (17 odczytów zamiast 72), Mazowiecki (6 zamiast 13), Wrocław (36 zamiast 45) i Szczecin (24 zamiast 32); dwa inne (Gdański i Gliwicki) mają tylko nieznaczne niedociągnięcia.

Na liczbę 9 konferencji krajowych w 1954 r. składają się: 2 konferencje zorganizowane łącznie z PKPG na temat oszczędności paliwa i energii, 2 konferencje wspólnie z PAN i IEL poświęcone wyłącznikom i maszynom elektrycznym, 2 konferencje były z zakresu łączności — linie telekomunikacyjne i systemy radiofonizacji, wreszcie po jednej konferencji poświęcono „małej energetyce” (zorganizowanej przez Oddział Krakowski w Kryniczy, elektryfikacji gospodarstwa domowego (przy współdziałaniu Min. Przem. Drobego i Rzemiosła) i programom nauczania w szkołach wyższych.

Sprawozdanie z działalności SEP w 1954 r. (IV kwartał i cały rok)

1. Dane ogólne	Początek roku (liczba)	Początek IV kwart. (liczba)	Koniec roku (liczba)	Do 30.9.54 (%)	Do 31.12.54 (%)
Członkowie	10150	11957	12458	118	123
Oddziały	24	24	24	100	100
Koła zakładowe	220	310	331	141	150
Członkowie kół	5940	8523	9397	143	158

2. Szkolenie	IV kwartał		Rok 1954		Wykonanie planu rocznego (%)
	liczba imprez	liczba uczestników	liczba imprez	liczba uczestników	
Odczyty	356	11425	1112	29325	139
w tym z pokazem filmów	37	980	108	3006	900
Kursy szkolenia zawodowego	45	958	207	3449	690
Kursy na stopień inżyniera	2	1248	2	1248	200
Ośrodki konsultacyjne na stopień inżyniera	15	1248	15	1248	200
Konferencje krajowe	4	710	9	2035	100
Konferencje lokalne i narady techniczne	167	—	603	—	114
Czasopisma:					
a) prenumeratorzy		przybyło 207	—	4507	90
b) korespondencje z terenu	55	—	148	—	67
Opieka nad bibliotekami	151	—	151	—	126
Wystawy:					
a) racjonalizatorskie	4	3600	13	21900	217
b) książek i czasopism	3	—	6	—	100
Wycieczki:					
a) zorganizowane	42	1579	132	4096	440
b) przyjęte	14	—	47	—	—

3. Wynalazczość pracownicza i zobowiązania	IV kwartał			Rok 1954			Wykonanie planu rocznego (%)
	liczba	liczba uczestników	wartość (tys. zł)	liczba	liczba uczestników	wartość (tys. zł)	
Brygady robotniczo-inżynierskie:							
a) nowe	34	92	—	245	543	—	111
b) działające w końcu roku	—	—	—	168	427	—	—
Członkowie SEP w KTiR	—	ubyło 111	—	—	1837	—	209
Projekty racjonalizatorskie	1230	—	4836	2753	—	10647	550
Zobowiązania:							
a) indywidualne	2573	2573	1045	6030	6030	6304	201
b) zespołowe	1302	3120		3507	7581		590

Wykonanie planu w zakresie porad technicznych zawdzięczamy tylko kilku oddziałom (Lublin, Kielce, Kraków, Łódź, Zagłębie), które plan wysoko przekroczyły. Wszystkie inne oddziały nie wykazały w ogóle żadnej albo tylko małą działalność w tym zakresie. Przypuszczalnie winą tego stanu rzeczy spada w dużej mierze na brak sprawozdań z kół o odbytych poradach, których, jeśli odbyły się one wspólnie z innymi zakładowymi organizacjami, nie zaliczono do osiągnięć SEP.

d) Osobną grupę stanowią akcje i imprezy, w których wyniki przekraczają wielokrotnie liczby zadane planem. Oczywiście, nie jest to powód do wielkiej dumy, lecz raczej trzeba stwierdzić, że plan był wadliwie ułożony, opracowano go przecież po raz pierwszy na rok 1954. Błąd polegał na tym, że uwzględniono w nim tylko nieliczne imprezy finansowane centralnie przez NOT, natomiast nie liczono się z zaradnością i samowystarczalnością kół zakładowych, które wiele imprez potrafiły zorganizować, zdobywając na nie fundusze z innych źródeł. Do imprez takich należy wyświetlanie filmów (9 razy więcej niż planowano), wycieczki (które po zastój w ubiegłych latach uzyskały bardzo wielką popularność) i kursy podwyższające kwalifikacje zawodowe.

Ponad 200 kursów, które zorganizowane zostały przez koła bez kosztów dla NOT, stanowią bardzo ciekawy przejaw działalności, który należałoby szczegółowiej zbadać. Odpowiedzi w sprawozdaniach są w tym zakresie wskutek braku wyraźnej instrukcji dość bałamutne, bo niekiedy podawane bywają kilkakrotnie te same kursy, jeżeli trwają one dłużej niż kwartał; czasem wpisywano liczby uczestników na początku kursu, a innym razem absolwentów itd. W wielu przypadkach brak w ogóle bliższych danych. Dlatego rozpisana została ankietka, dotycząca specjalnie kursów, z prośbą o udzielenie przez koła informacji o każdym kursie, który odbył się w ubiegłym roku.

Niestety, odpowiedzi wpływają tak opieszale, że w chwili przygotowywania tego sprawozdania do druku były dane tylko o 20% kursów. Temat ten będzie naświetlony w następnym sprawozdaniu.

e) W zakresie wynalazczości pracowniczej i zobowiązań osiągnięto bardzo poważne wyniki, jakkolwiek trzeba zaznaczyć, że przy częstym braku konkretnych odpowiedzi wartość projektów racjonalizatorskich i zobowiązań wypada w wielu przypadkach oszacować.

f) Pozycjami, w których plan nie został wykonany, są korespondencje z terenu do prasy i liczba prenumeratorów. Przy układaniu planów założono, kierując się sugestią NOT, że każde koło zakładowe przysłać choć po jednej notatce w ciągu roku do czasopism technicznych lub do gazet codziennych. Mimo skierowania odpowiednich pism z redakcji do oddziałów (np. z „Wiadomości Elektrotechnicznych”) akcja ta „nie chwyciła”. Obserwujemy nadal zjawisko, że w licznych ośrodkach praca rozwija się pomyślnie, ale nikt nie chce się nią pochwalić. Na wzmożenie liczby korespondencji w roku 1955 należy więc położyć większy nacisk.

Natomiast liczba prenumerat ulgowych prelimitowana była w założeniu, że co drugi członek zaabonuje 1 pismo. Okazało się to nierealne, a ponadto dokładne ustalenie tej liczby nie jest możliwe. Członkowie w kołach mają możliwość czytania czasopism technicznych w swych zakładach, w czytelnich, świetlicach i bibliotekach publicznych. Do indywidualnego abonowania zniechęcają ciągle jeszcze sygnalizowane zaniedbania obsługi „Ruchu”. Wreszcie prenumerat ulgowy przyjmują także bezpośrednio placówki NOT albo inne stowarzyszenia techniczne, a więc komórki SEP nie zawsze mają informację o wszystkich prenumeratorach. W tych warunkach wykazaną w sprawozdaniach liczbę 4507 prenumerat należy ocenić raczej jako wynik pozytywny.

BIULETYN INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI

Rok IX — nr 2

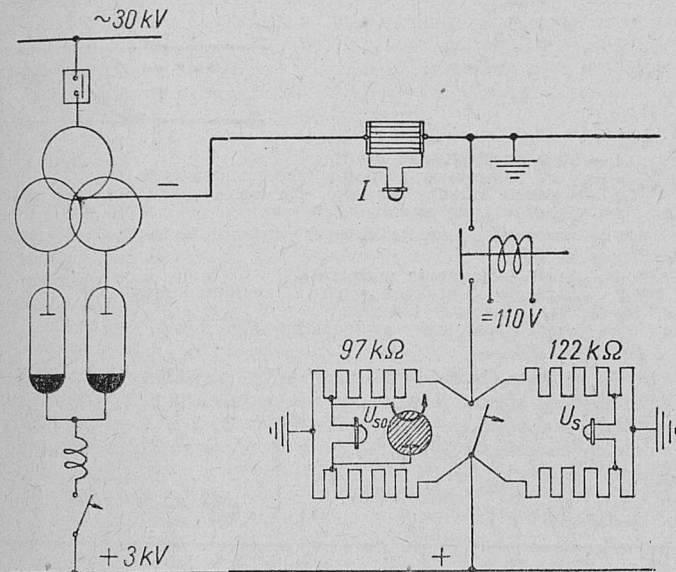
Warszawa, Piętna 68

Kwiecień 1955 r.

ZAKŁAD TRAKCJI

WYZNACZENIE PO CZĄTKU KRZYWEJ NAPIĘCIA POWROTNEGO W WYŁĄCZNIKACH TRAKCYJNYCH

Zakład Trakcji IEL od szeregu lat prowadzi próby zwarciowe na prostownikowych stacjach trakcyjnych (3 kV), które mają między innymi na celu ustalenie wyłączalności wyłączników. Podczas tych prób w układzie podanym na rys. 1 rejestruje się przy pomocy oscylografu pętlicowego następujące wielkości:

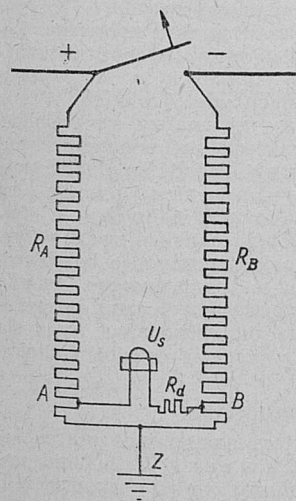


Rys. 1. Układ połączeń do prób zwarciowych wyłączników trakcyjnych prądu stałego

struje się przy pomocy oscylografu pętlicowego następujące wielkości:

- 1) napięcie z generatora podstawy czasu o częstotliwości 100 Hz jako skalę czasu,
- 2) prąd zwarciowy,
- 3) napięcie między stykami badanego wyłącznika.

Otrzymane przebiegi powinny umożliwić określenie czasu własnego badanego wyłącznika jako odległości między odciętą punktu, odpowiadającego wartości prądu nastawienia wyłącznika, i odciętą punktu, odpowiadającego początkowi rozchodzenia się styków wyłącznika, o czym świadczy pojawienie się między nimi napięcia.



Pomiar napięcia między stykami wyłącznika wykonywa się przy pomocy układu przedstawionego na rys. 2. W układzie tym do pomiaru użyto dzielnika oporowego o dwóch symetrycznych gałęziach. Z chwilą rozejścia się styków wyłącznika pojawia się między nimi napięcie i występuje łuk.

Pomiar napięcia między stykami wyłącznika wykonywa się przy pomocy układu przedstawionego na rys. 2. W układzie tym do pomiaru użyto dzielnika oporowego o dwóch symetrycznych gałęziach. Z chwilą rozejścia się styków wyłącznika pojawia się między nimi napięcie i występuje łuk.

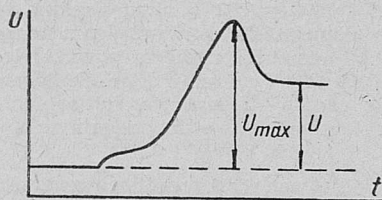
Rys. 2. Układ do pomiaru całkowitego U_s między stykami wyłącznika

W okresie początkowym spadek napięcia na krótkim łuku jest niewielki. Następnie łuk zostaje wydmuchnięty do komory łukowej i spadek napięcia szybko rośnie. W wyniku zmniejszenia się prądu w obwodzie, rośnie gwałtownie napięcie między stykami wyłącznika.

Na podstawie wykonywanych prób zwarciowych należy się liczyć z możliwością wystąpienia przepięcia rzędu 300% napięcia znamionowego, a więc około 9000 V. Przy zamkniętym wyłączniku przez pętlę oscylografu nie płynie prąd (potencjały punktów A i B dzielnika są jednakowe), a pętlica kreśli linię zerową. Przy wyłączniku otwartym przez pętlę płynie prąd proporcjonalny do napięcia szyny zbiorczej. W okresie przejściowym w czasie łukowym wyłącznika pętlica rejestruje przebieg zmian napięcia między stykami. Uzyskiwany przebieg ma kształt jak na rys. 3.

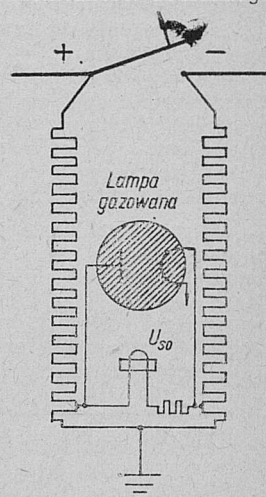
Opisana metoda pomiaru daje dobre wyniki, jeżeli chodzi o uchwycenie charakteru przebiegu napięcia w czasie otwierania wyłącznika i określenie wartości maksymalnego przepięcia, natomiast zawodzi, jeżeli chodzi o dokładne określenie czasu własnego wyłącznika.

Przy pomiarach na wysokim napięciu 3 kV określenie czasu własnego jest utrudnione wskutek niemożności dokładnego



Rys. 3. Przebieg napięcia U_s

Rys. 4. Układ do pomiaru napięcia U_{s0} z zastosowaniem lampy gazowanej



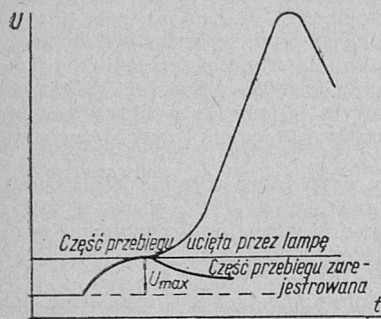
określenia chwili pojawienia się napięcia między stykami wyłącznika. Chcąc otrzymać na oscylogramie cały przebieg napięcia, należy skalować pętlę z uwzględnieniem maksymalnego przepięcia tzn. na 9000 V, nie dopuszczając do przekroczenia maksymalnego wychylenia pętlicy, które wynosi 30 mm przy długości promienia świetlnego 0,5 m. Natomiast dla określenia czasu własnego należy dokładnie znać początkowy przebieg napięcia na łuku w granicach 0—100 V. Przy równomiernej skali dla 9000 V ustalono wychylenie 30 mm, a więc dla 100 V otrzymuje się wychylenie 1/3 mm, co praktycznie nie daje możliwości odczytania na oscylogramie.

W celu określenia czasu własnego wyłącznika należy w możliwie dużej skali zarejestrować tylko początek krzywej napięcia powrotnego do wartości najwyżej 300 V. Przyjmując dla tej wartości maksymalne wychylenie pętlicy, należy ją następnie zewrzeć w celu zabezpieczenia przed przepaleniem przy dalszym narastaniu napięcia. Ze względu na szybkość przyrostu rejestrowanego napięcia urządzenie zwierające musi działać bez opóźnienia. Zagadnienie to rozwiązano stosując lampę gazowaną (tyratron) o małym napięciu zapłonu. Do pomiaru napięcia między stykami stosujemy tu układ przedstawiony na rys. 4. Przy zamkniętym wyłączniku przez pętlę nie płynie prąd. Gdy styki zaczynają się rozdzielać, na pętlicy pojawia się napięcie, które wzrasta aż do chwili zapłonu lampy. Przez zapłon lampy pętlica zostaje zwarta i napięcie — choć między stykami wyłącznika nadal wzrasta — na pętlicy pozostaje stałe. Odpowiedni przebieg pokazany jest na rys. 5. Do urządzenia obcinającego wysokie napięcie zastosowano lampę typu TG 1-01/1,3 produkcji radzieckiej o następujących danych:

maksymalne napięcie anodowe	650 V,
maksymalny prąd anodowy	100 mA,
napięcie żarzenia	6,3 V,
prąd żarzenia	0,6 A,
napięcie zapłonu przy siatkach przyłączonych do katody	13,5 V,
napięcie gaśnięcia lampy	11,5 V.

Punktem wyjściowym do obliczeń było napięcie zapłonu lampy.

Prąd płynący przez opory dzielnika nie powinien ich grzać nadmiernie, a z drugiej strony powinien być dostatecznie duży, aby można było odprowadzić jego część do pętlicy oscylografu. Oporność gałęzi dzielnika była ustalona na 97 kΩ z odgałęzieniem pomiarowym na 5 kΩ, przekładnia dzielnika wynosiła więc $97\,000 : 5\,000 = 19,4$.



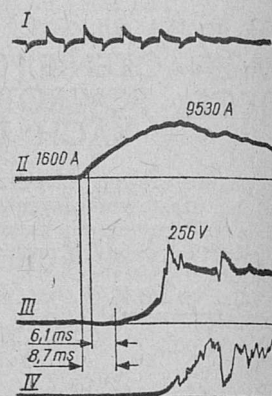
Rys. 5. Przebieg napięcia U_s .

Lampa zapala się i zwiera pętlę przy napięciu między stykami wyłącznika $U_s = 13,5 \cdot 19,4 = 262$ V. Stąd wynika, że pętlica przy maksymalnym dopuszczalnym wychyleniu może zarejestrować napięcie 262 V, odcinając napięcie powyżej tej wartości. W tym przypadku dla 262 V możemy dopuścić 30 mm wychylenia pętlicy tak, że chwila pojawienia się napięcia w łuku zaznaczy się na oscylogramie łatwo dostrzegalnym wychyleniem pętlicy.

Opisane urządzenie jest stosowane przy próbach zwarcio- wych i daje dobre wyniki. Dla ilustracji na rys. 6/podano oscylogram próby zwarciowej. Z porównania przebiegów III i IV jasno wynika korzyść zastosowania urządzenia. Zapłon lampy na przebiegu III uwiłdocił się charakterystycznym szczytem. W chwili osiągnięcia szczytu pętlica została zwarta i — choć napięcie na stykach wyłącznika nadal wzrastało — na pętlicy

nie przekroczyło określonej wartości. Napięcie na stykach wyłącznika odpowiadające napięciu zapłonu lampy wynosi 256 V.

Przy stosowaniu opisanego urządzenia rejestrowane napięcie U_{so} jest przebiegiem napięcia U_s w innej skali tylko do



Rys. 6. Oscylogram próby zwarciowej przy zastosowaniu urządzenia do pomiaru początku narastania wysokiego napięcia między stykami wyłącznika

- I — stała częstotliwości 100 Hz
- II — prąd zwarciowy zespołów prostownikowych (I_1)
- III — napięcie między stykami, dla uchwycenia początku rozchodzenia się styków (U_s)
- IV — napięcie całkowite między stykami badanego wyłącznika (U_{so})
- 1600 A — prąd nastawienia wyłącznika
- 256 V — napięcie na stykach w chwili zapłonu lampy
- 6,1 ms — czas własny wyłącznika
- 8,7 ms — czas przedłukowy wyłącznika

chwili zapłonu lampy. W przypadku powtórnych zapłonów łuku między stykami badanego wyłącznika lampa gaśnie przy napięciu na stykach wyłącznika $U = 11,5 \cdot 19,4 = 223$ V, co pozwala na orientacyjne ustalenie strefy przeskoku łuku wkomorze łukowej.

Inż. Z. Wesołowski

Wydawnictwa nadesłane

SKOCZYŃSKI Z., mgr inż., NOWACKI P. J., dr inż. ZWARCIA W WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADACH ENERGOELEKTRYCZNYCH. 1954, Warszawa, Państwowe Wydawnictwa Techniczne. Format B5, str. 832, cena 57 zł. — Spis rzeczy: I. Zasady obliczania prądów zwarcio- wych przy zwiarcach symetrycznych. Wiadomości ogólne. Schemat zastępczy układu energoelektrycznego. Elementy w schemacie zastępczym przy zwiarcach symetrycznych. Podstawowe zasady przekształcania układów energoelektrycznych przy obliczaniu prądów zwiarc symetrycznych. Zasada superpozycji przy obliczaniu prądów zwarcio- wych. Zastosowanie zasady przeciwsobnych SEM-yh i zastępczej SEM-ej w miejscu zwarcia. Zasada uogólnienia zastępczej SEM-ej. Zastosowanie analizatora stałoprądowego. — II. Analiza przebiegów zwarcio- wych w maszynach synchronicznych przy zwiarcach symetrycznych. Ogólne własności prądnicy synchronicznej w ustalonych warunkach pracy. Wstępne wiadomości o stanach nieustalonych. Wstępne wiadomości o przebiegach zwarcio- wych w prądnicy synchronicznej. Warunek stałości liczby skojarzeń magnetycznych przy analizowaniu zwarcia na zaciskach prądnicy synchronicznej. Zwiarcie trójfazowe w obwodzie wzbudzonej prądnicy synchronicznej, której uzwojenie wzbudzające jest jedynym obwodem elektrycznym wirnika. Zwiarcie trójfazowe w obwodzie wzbudzonej prądnicy synchronicznej z uzwojeniem tłumiaczym w obu osiach zastępczych. — III. Zasady obliczania prądów i napięć przy zwiarcach niesymetrycznych metodą składowych symetrycznych. Wiadomości ogólne. Zasady stosowania teorii składowych symetrycznych do analizy zwiarc niesymetrycznych. Zwiarcia niesymetryczne. Oporności zastępcze wysokonapięciowych linii napowietrznych trójfazowych. Oporności zastępcze kabli energoelektrycznych. Oporności zastępcze maszyn synchronicznych. Oporności zastępcze transformatorów. Obliczenie rozpięty prądów i rozkładu napięć przy zwiarcu doziemnym w dużym układzie energo-

elektrycznym. Przebieg w czasie prądu zwarcio-owego przy zwiarcach niesymetrycznych. — IV. Metody obliczeń zwarcio-owych stosowane w praktyce. Wyznaczanie prądów zwarcio-owych w różnych chwilach czasowych. Przebiegi napięciowe przy przerywaniu obwodu zwiarcio-owego. — Ze wstępu: Książka zajmuje się fragmentem problematyki związanej z zagadnieniami zwarcio-owymi w układach wysokonapięciowych. Omówiono w niej zasady i podstawy teoretyczne ustalania drogą analityczną warunków zwarcio-owych w wysokonapięciowych układach energoelektrycznych o bezoporowym lub małooporowym uziemieniu punktu zerowego. Zakres książki nie obejmuje zagadnień związanych z warunkami zwarcio-owymi powstającymi w układach o izolowanym punkcie zerowym oraz przy zwiarcach wielokrotnych. W obu przypadkach podstawy teoretyczne tej analizy są podobne, wymagają jednak rozszerzenia zakresu omówionych metod obliczeniowych. Książka nie obejmuje zagadnienia obliczania zwiarc w sieciach niskonapięciowych, wymaga ono bowiem odmiennego naświetlenia i badań doświadczalnych. — Informacje wydawcy: Książka zawiera ogólną analizę zwiarc w wysokonapięciowych układach energoelektrycznych o bezpośrednim lub małooporowym uziemieniu punktu zerowego. Książka jest przeznaczona dla inżynierów pracujących przy projektowaniu i eksploatacji układów energoelektrycznych oraz dla studentów kursu magisterskiego wyższych uczelni technicznych.

Archiwum Elektrotechniki

Tom III, zes. 2, rok 1954, zawiera następujące prace: Ję- zewski M., Szklarski L., Kawecki Z. Badania magnetycznych pól rozproszenia, pochodzących od uszkodzeń w linach drucianych w związku z elektromagnetyczną metodą badania lin. — Kulikowski R. Obliczanie liniowych układów impulsowych. — Keller J., Ekiel J. Nowa metoda odwzorowania przestrzennego prądów czynnościowych serca. — Cholewicki T. Macierze składowych symetrycznych. (Str. 308, cena 15 zł).



PRZEGŁĄD DOKUMENTACYJNY ELEKTROTECHNIKI

opracowany przez OŚRODEK DOKUMENTACJI ELEKTROTECHNIKI
Dodatek do miesięcznika PRZEGŁĄD ELEKTROTECHNICZNY

Rocznik 7

Warszawa, kwiecień 1955 r.

Nr 4

Gwiazdkami obok porządkowych liczb artykułów oznaczone są publikacje znajdujące się w bibliotece Instytutu Elektrotechniki

Maszyny elektryczne

Transformatory

158* 621.313.333.001.24:621.3.045.53 D1
Schmalz A.: Uproszczenia sprawdzania liczby drutów w żłobku silników trójfazowych. „Vereinfachung der Kontrolle der Leiterzahl je Nut bei Drehstrommotoren”. Elektrotechnik (Berlin), Leipzig, mies., t. 7, Nr 9, wrzes. 53, s. 460; A4, 2 str., 1 rys., 1 tabl. — Analiza wzoru określającego liczbę drutów w żłobku silnika trójfazowego. Opis nomogramu, pozwalającego na szybkie rozwiązanie wzoru i sposób posługiwania się nim. Ustalenie ważniejszych parametrów. Przykład wyznaczenia liczby drutów w żłobku.

159* 621.313.333.025.3:621.3.064:621.3.015.3 D1
Fourmarier P.: O przepięciach o stromym czole, na jakie mogą być narażone silniki trójfazowe przy włączaniu i wyłączaniu do sieci kablowej. „Sur les surtensions à front raide auxquelles peuvent être soumis les moteurs triphasés raccordés à un réseau de cables lors de l'enclenchement et du déclenchement”. Bull. Soc. franc. electr., Paris, mies., Nr 32, sierp. 53, s. 447; A4, 8 str., 11 rys., 8 wyk. — Przepięcia przy włączaniu silników. Teoria, oscylogramy doświadczeń, przeliczenia. Przepięcia międzyzwojowe. Wyłączanie silników. Teoria, oscylogramy, warunki powstawania najbardziej niebezpiecznych przepięć. Wnioski.

160* 621.313.333.025.3:621.3.041.1 D1
de Jong H. C. J.: Prawidłowy dobór głównych wymiarów silników 3-fazowych. „Die richtige Wahl der Hauptabmessungen von Drehstrommotoren”. E und M, Wien, dwutyg., Nr 1, stycz. 53, s. 11; A4, 5 str., 4 wyk. — Wpływ wielkości stosunku długości do średnicy pakietu blach na uzyskanie korzystnych własności silników. Wzory, pozwalające na określenie tego stosunku dla możliwie największej sprawności. Wyniki obliczeń jednej z wykonanych serii silników przedstawione w postaci krzywych.

161* 621.313.333.027.5:621.3.3.045.12 D1
Ude W.: Wykonywanie uzwojenia wsypywanego silników trójfazowych wysokonapięciowych z drutu emaliowanego lakierem izo-perlonowym. „Träufeln von Drehstrom-Hochspannungsmotoren mit Iso-Perlon-Lackdraht”. Elektrotechnik, (Berlin), Leipzig, mies., t. 7, Nr 8, sierp. 53, s. 399; A4, 1 str., 2 rys. — Opis uzwojenia, polegającego na zastąpieniu dotychczas stosowanych sztych uzwojeń stojanów wysokonapięciowych silników indukcyjnych przez uzwojenie wsypywane, wykonane z drutu emaliowanego w oprzędzie izo-perlonowym. Zestawienie materiałów i kosztów obu wykonanych uzwojenia. Korzyści nowego sposobu nawijania.

162* 621.313.333.2.001 D1
Kučera J. Silniki asynchroniczne z wirnikami dwukłatkowymi. „Asynchronmotoren mit Doppelkäfiganker”. E und M, Wien, dwutyg., r. 70, Nr 8, kw. 53, s. 165; A4, 13 str., 1 rys., 9 wyk. — Teoria silnika dwukłatkowego w oparciu o rachunek tensorowy. Wyznaczenie macierzy pozwalającej na obliczenie prądów w poszczególnych uzwojeniach. Wykresy wektorowe prądów. Wyznaczenie momentu obrotowego i mocy użytecznej oraz wykreślenie przebiegów tych wielkości.

163* 621.313.333.2.001.24 D1
Obermoser K.: Wyprowadzenie znaczenia klasycznego silnika klatkowego na podstawie wykresu Heylanda. „Die Ableitung der Bedeutung des klassischen Käfigankermotors aus dem einfachen Heylandkreis”. E und M, Wien, dwutyg., r. 70, Nr 22, list. 53, s. 505, Nr 23, list. 53, s. 530, Nr 24, grud. 53, s. 555; A4, 17,5 str., 10 wyk., 6 poz. bibl. — Wnioski z wykresu Heylanda uzyskane przez analizę trygonometryczną tego wykresu, a podające zależności między podstawowymi wielkościami charakterystycznymi klasycznego silnika klatkowego. Podstawy oceny silnika. Analiza przebiegu momentu obrotowego w funkcji poślizgu i jego ocena. Wnioski, wynikające z charakterystyki momentu o funkcji prądu. Ocena nagrzewania się maszyny. Niektóre własności krzywych „normalnych” przedstawiających wielkości względne. Ogólne podstawy oceny konstrukcji silnika klatkowego.

164* 621.314.21.001.4:621.317.33 D1
Mareneci R.: Pomiar oporności dodatkowej transformatora trójzwojeniowego. „Misura delle resistenze addizionali dei trasformatori a tre avvolgimenti”. Elettrotecnica, Milano, mies., Nr 6, czerw. 53, s. 303; A4, 2 str., 2 tabl. — List dyskusyjny z artykułem prof. Correggiani z r. 1942 na podstawie wymagań normy krajowej w zakresie pomiaru oporności maszyn elektrycznych. Wpływ oporności dodatkowej na rzetelność pomiarów oporności faz transformatorów. Błędy rzędu 60%.

165* 621.314.21.004.24 D1
Kondachan W. S.: Do pomocy studiującemu nowe „Przepisy technicznej eksploatacji elektrowni i sieci elektrycznych. „W pomoszcz izuczajuszczemu nowyje „Prawila tiechniczieskoj eksploatacji elektriczieskich stancij i sietiej”. Energietik, Moskwa, mies., Nr 7, grud. 53, s. 25; B5, 5 str., 1 poz. bibl. — Dotyczy eksploatacji transformatorów. Sposób ustawienia transformatora w rozdzielni wnękowej. Kontrola stanu oleju. Zagadnienie nagrzewania się transformatora, różne rodzaje chłodzenia. Łączenie równoległe transformatorów. Przeciążanie transformatorów. Badania profilaktyczne izolacji uzwojeń.

166* 621.314.21.004.5 D1
Korż N. A.: O przeglądach transformatorów w elektrowniach wodnych bez wyjmowania rdzenia. „O riewizij moszcznych transformatorow bez wyjomki sierdiecznika na gidroelektro-stancjach”. Energietik, Moskwa, mies., Nr 2, lip. 53, s. 4; B5, 2 str. — Artykuł dyskusyjny do szeregu publikacji z r. 1952 na temat usprawnienia przeglądów transformatorów. Ekonomiczne i techniczne znaczenie szybkich przeglądów i remontów. Przypadek rozwiązania zagadnienia w podstacji 110/35/10 kV przy elektrowni wodnej.

167* 621.314.21.027.3 D1
Transformatory. „Transformatoren”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., Nr 1/2/3, stycz.—luty—marz. 53, s. 43; A4, 6,5 str., 9 fot. — Uwagi odnośnie nowych konstrukcji transformatorów wysokich i najwyższych napięć. Transformatory z regulacją pod obciążeniem. Grupy transformatorów jednofazowych najwyższych napięć (220/110 kV). Transport i montaż wielkich jednostek. Sposób zainstalowania transformatorów w różnych rozdzielniach europejskich (Niemcy, Szwajcaria, Szwecja, Dania).

168* 621.314.21.042.1.001.24 D1
Hammerl N.: Obliczanie transformatora dla określonego napięcia zwarcia. „Berechnung einer Transformators bei vorge-schriebener Kurzschlussspannung”. E und M, Wien, dwutyg., r. 70, Nr 2, stycz. 53, s. 26; A4, 5 str., 2 rys., 6 wyk. — Obliczanie przekroju żelaza przy uwzględnieniu napięcia zwarcia. Uproszczenie obliczeń przez wprowadzenie praktycznie stałej wielkości λ , określającej stosunek długości zwoju do długości drogi strumieni rozproszenia. Wzory na obliczenie wymiarów okien.

169* 621.314.21.062.6 D1
Rösch M.: Metoda obliczania napięcia zwarcia uzwojeń transformatorów w układzie w zygzak. „Verfahren zur Berechnung der Kurzschlussspannung der Transformatorentwicklungen in Zick-Zack Schaltung”. E und M, Wien, dwutyg., r. 70, Nr 6, marz. 53, s. 125; A4, 6 str., 2 rys., 3 wyk. — Metoda obliczania całkowitej oporności zwarcia transformatorów pracujących w układzie w zygzak przy dowolnym fazowym kącie przesunięcia napięć obu gałęzi układu w zygzak. Przytoczony przykład praktyczny potwierdził zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

Linie napowietrzne

170* 621.315.1.027.3:621.346.99 D1
Szerencis A. N.: Uziemienia linii przesyłowych wysokiego napięcia. „Zaziemlenija linii przesyłowych na wysokowolnych liniach elektropriedaczi”. Energietik, Moskwa, mies., Nr 7, grud. 53, s. 22; A4, 3 str., 4 rys. — Wymagania oporności

uziemień linii z przewodami odgromowymi (220, 110 kV, 35 kV na podejściach) stawiane przez założony piorunowy poziom izolacji. Konstrukcja konturów uziemień (rurowych i taśmowych) dla słupów stalowych z betonowymi fundamentami oraz dla słupów drewnianych. Prowadzenie przewodów uziemiających i łączenie przewodów odgromowych na słupach drewnianych.

171* 621.315.145.027.8 D1
Dvořáček E.: **Znaczenie przewodów wiązkowych w sieciach najwyższych napięć.** „Význam svarkových vodičů v sítích vvn” Energetika, Praha, mies., Nr 9, wrzes. 53, s. 299; A4, 4,5 str., 10 rys., 3 tabl., 12 poz. bibl. — Stosowanie przewodów wiązkowych w różnych układach przewodów. Obliczanie pojemności indukcyjności i oporności falowej linii z przewodami wiązkowymi. Wpływ przewodów wiązkowych na rozkład pola i naprężenia maksymalne. Porównanie promieni przewodów pojedynczych i wiązkowych w szeregu linii 380 kV. Sposób zawierania dwu-, trzy- i czterokrotnych przewodów wiązkowych.

172* 621.315.177.027.3:624.152 D1
Karmasin M.: **Mechanizacja robót ziemnych przy budowie linii przesyłowych wysokich i najwyższych napięć.** „Mechanisce zemnich praci na stavbě venkovních vedení vn a vvn”. Energetika, Praha, mies., Nr 11, list. 53, s. 365; A4, 1,5 str., 2 rys., 3 poz. bibl. — Objaśnienia pracy koparki traktorowej oraz świdra traktorowego przy wykonywaniu wykopu. Porównanie wydajności pracy mechanicznej i ręcznej dla przykładu linii 110 kV i 220 kV. Rozporządzenie mechanizacji w CSR na podstawie doświadczeń ze Związku Radzieckiego.

Kable

173* 621.315.2:614.825 D1
Ochrana przed zbyt wielkim napięciem dotyku w sieciach kablowych. „Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung in Kabelnetzen”. Elektrizitätswirtschaft, Frankfurt a/Mein, dwutyg., Nr 8, kw. 53, s. 216; A4, 1 str. — Środki ochronne w sieci kablowej niskiego napięcia (380 V z punktem zerowym uziemionym). Zabezpieczanie przed przerwaniem przewodu zerowego na rozdzielni zasilającej. Uziemianie na terenie przyłączy odbiorczych przy pomocy instalacji wodociągowej. Ochrona muf i armatur.

174* 621.315.2.025.1.004 D1
Pogarski W. I.: **Eksplotacja kabli jednofazowych.** „Eksplotacja odnofaznych kabelej”. Energetik, Moskwa, mies., Nr 6, list. 53, s. 25; A4, 3 str., 6 rys., 1 tabl. — Stosowanie kabli jednofazowych w elektrowniach i rozdzielniach (odcinki generator-szyny, transformator-szyny). Prawidłowe układanie i łączenie kabli w przypadku stosowania kilku równoległych kabli na fazę. Zagadnienie nierównomierności rozkładu prądu w kablach. Wpływ oporności indukcyjnej kabli. Uwagi o stanach izolacji kabli 6–10 kV.

Przewody

175* 537.525.9.001.24:621.315.5 D1
Chůra V.: **Natężenie pola na powierzchni przewodu.** „Gradient na povrchu lana”. Elektrotechn. Obz., Praha, mies., Nr 11, list. 53, s. 620; A4, 4 str., 5 rys., 1 tabl., 2 poz. bibl. — Matematyczne wyznaczanie potencjału w pobliżu przewodu. Natężenie pola na powierzchni dla przypadku przewodu walcowego (druć) i odkształconego (linka). Wpływ zwiększonych natężeń na powierzchni linki na starzenie izolacji kabla. Opracowanie praktycznej metody wyznaczania potencjału elektrostatycznego dla rozpatrywanego przypadku.

176* 621.315.53:621.315.682:621.791.052 D1
Vodvářka K.: **Elektryczne spawanie końców kabli aluminiowych.** „Elektrické svařování konců klinikových kabelů”. Elektrotechnik, Praha, mies., Nr 11, list. 53, s. 253; A4, 1 str., 1 fot., 1 rys. — Metoda spawania aluminium. Wykonanie uchwytu — kolby spawalniczej. Zasilanie urządzenia, przebieg wykonywania pracy. Uwagi o prostocie i innych zaletach tego rodzaju łączenia.

Materiały izolacyjne

177* 621.3.048:621.315.612.6 D1
Lebr. V.: **Zalety zastosowania szklanej izolacji do maszyn elektrycznych.** „Opravy elektrických strojů s použitím skelné isolace”. Elektrotechnik, Praha, mies., Nr 1, styc. 54, s. 14; A4, 5,5 str., 8 rys., 2 poz. bibl. — Własności izolacji szklanej w porównaniu z impregnowaną i nieimpregnowaną izolacją włóknistą. Zmiany wytrzymałości mechanicznej pod względem temperatury. Zmiany wytrzymałości elektrycznej pod wpływem wilgoci. Niedostatki izolacji bawełnianej i azbestowej. Uwagi o praktycznym zastosowaniu szklanej izolacji.

178* 621.3.048:621.315.617.3 D1
Ehlers G.: **Sylikonowe materiały izolacyjne w budowie transformatorów.** „Silikon-Isolierstoffe im Transformatorenbau”. ETZ-A., Wuppertal, dwutyg., Nr 19, paźdz. 53, s. 553; A4, 5,5 str., 11 rys., 5 tabl., 11 poz. bibl. — Własności różnych typów lakierów sylikonowych (metylo-sylikony, metylo-fenilo-sylikony itp.). Nieznacząca stratność, mało zależne od temperatury w porównaniu z olejami. Łatwość suszenia, odporność cieplna. Znaczna wytrzymałość elektryczna mało podlegająca starzeniu. Fizyczne własności typowych sylikonów handlowych. Własności elektryczne taśm azbestowo-sylikonowych bądź szkłano-sylikonowych. Celowość stosowania materiałów sylikonowych do izolacji uzwojeń transformatorów.

Sieci i rozdzielnie

179* 621.316.13.027.3:621.3.054.42:621.3.012.2 D1
Wild J.: **Wykresy kołowe napięć fazowych i prądów zwarciowych w przypadku zwarcia w skompensowanej sieci wysokiego napięcia prądu zmiennego.** „Die Ortskurven der Spannungen gegen Erde und des Erdschlussstromes bei direkten Löschspule”. Bull. SEV, Zürich, dwutyg., Nr 2, styc. 54, s. 25; Löschspule”. Bull. SEV, Zürich, dwutyg., Nr 2, styc. 54, s. 25; A4, 5,5 str., 7 rys., 1 tabl. — Obliczanie napięć i prądów przy zwarciu jednofazowym metodą zastępczych sił elektromotorycznych. Wpływ oporności miejsca zwarcia oraz nastawienia dławika gaszącego w porównaniu z nastawieniem rezonansowym na napięcie i prądy przy zwarciu. Wykresy przepięć i prądów zwarcia przy kompensacji niepełnej. Przykłady obliczeniowe dla sieci 8 kV i 16 kV.

180* 621.316.267.027.3.002 D1
Postler L.: **Błędy przy budowie rozdzielni.** „Chyby při stavběch rozvodnů”. Energetika, Praha, mies., Nr 9, wrzes. 53, s. 310; A4, 2,5 str. — Najczęściej spotykane wady projektowania i budowy rozdzielni wysokich i najwyższych napięć. Przykłady braków i błędów w montażu. Uwagi o jakości materiałów i urządzeń użytych do budowy. Celowość planowania i właściwej organizacji budowy.

Wyłączniki

181* 621.316.54.027.3:621.3.064 D1
Zühlke M.: **Wymagania stawiane wyłącznikom wysokonapięciowym.** „Anforderungen an Hochspannungs-Leistungsschalter”. Elektrizitätswirtschaft, Frankfurt a/Mein, dwutyg., Nr 19, paźdz. 53, s. 573; A4, 2,5 str., 5 rys., 4 poz. bibl. — Charakterystyczne cechy wyłączników wielkich mocy na najwyższe napięcia (np. 8000 MVA, 300 kV). Charakterystyki dynamiczne łuku. Zagadnienie odłączania obwodu LC, wyłączanie nieobciążonego transformatora linii długiej, przepięcia łączeniowe.

182* 621.316.54.027.3:621.316.267 D1
Budowa wyłączników i aparatów. „Schalter- und Apparatenbau”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., Nr 1/2/3, styc.—lut.—marz. 53, s. 52; A4, 12 str., 17 fot., 2 rys., 4 tabl. — Wyłączniki powietrzne wysokich i najwyższych napięć (do 400 kV, 8600 MVA). Przepięcia łączeniowe w różnych układach sieci. Oscylogram przebiegu wyłączania. Przykłady instalowania wyłączników w rozdzielniach napowietrznych i wnetrzowych, rozdzielnie okapturzone. Stosowanie odłączników mocy. Odgromniki zaworowe w rozdzielni wewnętrznej. Przekładniki. Zespoły przekaźnikowe (ochrona odległościowa, nadmiarowa).

183* 621.316.54.027.3.001.4 D1
Helmchen G.: **Próby wyłączników wysokonapięciowych metodą pośrednią.** „Prüfung von Hochspannungsschaltern mit Hilfe indirekter Prüfverfahren”. Arch. techn. Messen, München, mies., Nr 212, wrzes. 53, s. 211; A4, 4 str., 9 rys., 15 poz. bibl. — Trudności techniczne i gospodarcze wykonywania prób bezpośrednich wyłączników o mocy rzędu tysięcy MVA. Stosowanie osobno prób wielkoprądowych, osobno prób napięciem odpowiadającym napięciu powrotnemu. Układy połączeń do wymodelowania kształtu napięcia powrotnego. Stosowanie generatora udarowego do prób napięciowych. Opis szeregu stosowanych metod pośrednich.

Regulacja

184* 621-523:621.316.7 D1
Madera A., Zühlsdorf W.: **Podstawy techniki sterowniczej przy elektroautomatyzacji urządzeń przemysłowych (dyskusja).** „Grundlagen der Steuerungstechnik bei der Elektroautomatisierung von Industrieanlagen (Diskussion)”. Elektrotechnik (Berlin), Leipzig, mies., t. 7, Nr 11, list. 53, s. 554; A4, 2,5 str., 3 rys. — Dyskusje na temat artykułu W. Zühlsdorfa

pod tyt. „Podstawy techniki sterowniczej przy elektroautomatyzacji urządzeń przemysłowych”. A. Madera proponuje uzupełnienie bardziej skomplikowanych schematów automatycznego sterowania uproszczonym sposobem łączeń dla uwytędnienia ich przebiegu w czasie i wzajemnej zależności. Proponuje w tym celu własną metodę. W. Zühlendorf w uzupełnieniu podaje dwie inne metody skróconego opisywania działania układów sterujących.

185* 621.316.718.5:621.3.077.3 D1
 Bechmann H.: **Rozruch napędów Leonarda przy nagłym przesterowaniu ze stanu spoczynkowego do obrotów przy osłabionym polu.** „Der Anlauf von Leonard-Antrieben bei plötzlichem Steuern von Stillstand auf eine Feldschwächungsdrehzahl”. E und M., Wien, dwutyg., r. 70, Nr 4, luty 53, s. 73; A4, 4 str., 3 wykr. — Analiza warunków pracy układu Leonarda przy rozruchu silnika napędowego przeprowadzanego w taki sposób, że na uzwojenie wzbudające prądnicę zostaje włączone napięcie, a równocześnie w obwód uzwojenia wzbudającego silnika zostaje włączony opór powodujący zmniejszenie pola silnika. Wyznaczenie równań na przyspieszenie prądu i czas trwania rozruchu. Porównanie tych wielkości z odpowiednimi wielkościami przy rozruchu bez osłabiania pola w odniesieniu do konkretnego przypadku.

Miernictwo elektryczne

186* 621.317.2:541.136.22 D1
 Eicke H., Kessner A.: **Sztabkowa konstrukcja westonowskich elementów normalnych.** „Eine stabförmige Bauart des Weston-Normalelementes”. ETZ-A, Wuppertal, dwutyg., r. 74, Nr 21, list. 53, s. 623; A4, 3 str., 1 fot., 1 rys., 3 wykr., 3 tabl. — Warunki techniczne na elementy normalne. Właściwości elementów normalnych konstrukcji w kształcie H (opór wewnętrzny, stałość SEM). Odmiennej od standardowego kształt elementów normalnych (walcowy). Właściwości elementów normalnych nowej konstrukcji. Zmiana SEM w zależności od temperatury otoczenia. Badania wpływu wytrząsania i zmian temperatury na SEM elementów normalnych. Porównanie elementów dawnej i nowej konstrukcji. Zachowanie się ogniwa przy poborze mocy.

187* 621.317.313:621.317.323 D1
 Schiele J.: **Mierniki prądu, napięcia i mocy wielkiej częstotliwości.** „Messgeräte für Strom, Spannung und Leistung bei Hochfrequenz”. Siemens Z., Erlangen, 8 razy w ciągu roku, Nr 1, luty 53, s. 25; A4, 7 str., 5 fot., 11 rys. — Przybory pomocnicze do mierzenia wielkości przy wielkiej częstotliwości. Teoria i opis konstrukcji prostownika cieplnego. Zastosowanie prostowników w przekładniach prądowych, dokładność różnych typów przyrządów. Stosowanie dzielników pojemnościowych do mierników napięcia typu Multiret. Zasada watomierza cieplnego wielkiej częstotliwości. Pomiar przyrządami o cewkach skrzyżowanych.

188* 621.317.329:536.12.001.24:621.438 D1
 Baumann H.: **Obliczanie rozkładu temperatury w wirnikach i cylindrach turbin gazowych przy pomocy wanny elektrolitycznej.** „Bestimmung der Temperaturverteilung in Gasturbinenrotoren und -zylindern mit dem elektrolytischen Trog”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., Nr 5/6, maj—czerw. 53, s. 189; A4, 7,5 str., 1 fot., 12 rys., 5 poz. bibl. — Odtworzenie rozprzysku strumienia cieplnego na modelu elektrycznym (prąd elektryczny w wannie elektrolitycznej). Przebieg obliczeniowy odwzorowania wielkości termicznych. Zastępczy schemat elektryczny modelu. Układ pomiarowy, opis, zasada działania. Sposób wykreślenia rozkładu temperatur.

189* 621.317.4:621.318.134 D1
 Burgt C. (i inni): **Metody pomiarowe dla określenia kilku właściwości magnetycznych materiałów „ferroxcube”.** „Messmethoden zur Bestimmung einiger magnetischen Eigenschaften von Ferroxcube-Werkstoffen”. Philips techn. Rdsch., Eindhoven, mies., t. 14, Nr 8, luty 53, s. 243; A4, 12 str., 2 fot., 5 rys., 2 wykr. — Najważniejsze właściwości materiałów magnetycznych (przenikalność, stratność). Porównanie specjalnych materiałów pod nazwą ferroxcube ze zwykłymi magnetykami metalowymi. Określenie właściwości materiałów magnetycznych w słabym i silnym polu. Pomiar przenikalności i stratności materiałów magnetycznych przy słabym polu magnetycznym i częstotliwościach 50 kHz do 10 MHz. Układ pomiarowy przy metodzie rezonansowej badania materiałów. Pomiar przy częstotliwościach do 3000 MHz. Układy i urządzenia pomiarowe. Pomiar magnetyczne przy silnych polach magnetycznych. Pomiar stratności.

190* 621.317.42.088.6:538.12 D1
 Brandstaetter F.: **O zjawiskach pomiarowych sondy Förstera w pobliżu ferromagnetyka.** „Über den Messeffekt der Förstersonde in der Nähe eines Ferromagnetikums”. E und M., Wien, dwutyg., r. 70, Nr 21, list. 53, s. 484; A4, 3 str., 1 rys., 3 wykr., 2 tabl. — Zniekształcenie zjawisk w sondzie Förstera w obecności ferromagnetyka. Proszkowi rdzeń żelazny solenoidu. Pomiar niejednorodnego pola magnetycznego wokół rdzenia przy pomocy sondy Förstera. Pomiar czynnej przenikalności sondą, porównanie wyników pomiarów i obliczeń.

191* 621.317.43:621.313.042.2 D1
 Pöllot O., Aichholz H.: **Ulepszone jarzmo przykładane dla nieniszczącego pomiaru stratności blach maszynowych.** „Ein verbessertes Anlegejoch zur zerstörungsfreien Messung der Verlustziffer von Dynamoblechen”. ETZ-A, Wuppertal, dwutyg., r. 75, Nr 1, styc. 54, s. 14; A4, 3 str., 2 fot., 6 rys., 5 wykr., 7 poz. bibl. — Przegląd stosowanych dotychczas urządzeń do badania stratności blach. Nowa konstrukcja jarzma przykładanego do blachy badanej. Analiza pracy nowego jarzma (układ zastępczy, charakterystyki stratności w funkcji grubości blachy, wpływ stratności jarzma i strat dodatkowych). Pomiar grubości blachy. Opis przyrządu do badania stratności blach. Charakterystyki dla różnych grubości blach.

192* 621.317.728:537.567 D1
 Gänger B.: **Wpływ naświetlania na udarowe napięcie przeskoku iskierników kulowych.** „Bestrahlungseinfluss beim Stossdurchschlag von Kugelfunkentrecken”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., Nr 7, lip. 53, s. 215; A4, 19 str., 14 rys., 1 tabl., 16 poz. bibl. — Historia podważenia 3-procentowej dokładności nienaświetlanych iskierników pomiarowych. Podstawy teoretyczne zagadnienia jonizacji gazu. Wpływ promieniowania beta umieszczonych w przerwie iskrowej preparatów radowych. Sposób przeprowadzania pomiarów napięcia udarowego. Krzywe prawdopodobieństwa przeskoku iskierników kulowych dla różnych odstępów i średnic iskierników. Wpływ różnych źródeł naświetlania oraz odległości źródeł na rozsypanie wartości na krzywych. Znaczący rozsypanie przy biegunowości dodatniej, nieznaczny przy ujemnej. Zalety naświetlania preparatami radowymi oraz bliskiego naświetlania lampą rtęciową. Teoretyczne wyjaśnienie rozsypania.

193* 621.317.799:533.275 D1
 Guthmann K.: **Samoczynny miernik wilgotności w szczególności dla gazów przemysłowych.** „Selbsttätige Feuchtigkeitsmessgeräte insbesondere für Industriegase”. Arch. techn. Messen, München, mies., Nr 213, paźdz. 53, s. 223; A4, 4 str., 3 rys., 3 wykr., 14 poz. bibl. — Samoczynne i rejestrujące mierniki wilgotności powietrza. Miernik wilgotności gazów przemysłowych na zasadzie psychrometru. Miernik wilgotności konstrukcji Siemens Halske (czujnik z wbudowanymi termometrami oporowymi, konstrukcje, zasada działania, przekazywanie pomiaru na odległość, diagramy z zapisu przebiegu wilgotności i temperatury gazu). Inne typy mierników wilgotności gazów (w wykonaniu amerykańskim).

Zastosowanie techniczne magnetyzmu

194* 621.318.3:621—39:622.233.2 D1
 Kiefer W.: **Elektromagnetyczny zawór ciśnieniowy w szczelnej obudowie.** „Schlagwettergeschütztes elektromagnetisches Druckluftventil dH 158 s 25”. Siemens Z., Erlangen, 8 razy w ciągu roku, Nr 1, luty 53, s. 48; A4, 1 str., 1 fot., 1 rys. — Opis obudowy i wyjaśnienie działania zaworu z napędem elektromagnetycznym. Szczelne połączenie przewodów doprowadzających. Zastosowanie sterowania wrębiarek w kopalniach węgla.

195* 621.318.43—71 D1
 Wheeler R.: **Wykonanie i chłodzenie dławików w odlewie betonowym.** „The performance and cooling of cast-in concrete reactors”. Proc. Inst. El. Engrs, London, t. 100, cz. 2, Nr 77, paźdz. 53, s. 551; A4, 9,5 str., 8 rys., 8 wykr., 3 tabl., 4 poz. bibl. — Ogólna charakterystyka dławików stosowanych dla ograniczenia prądu. Budowa dławików w odlewie betonowym. Obieg chłodzenia naturalnego. Charakterystyki cieplne (gradient temperatury). Wzrost temperatury przy różnych obiegach chłodniczych. Rozmieszczenie wlotów i wylotów obiegu chłodniczego. Wpływ warunków chłodzenia na temperaturę dławika. Charakterystyki cieplne dławików (graficzne). Przykład pracy dławika w sieci 33 kV (charakterystyki i dane eksploatacyjne).

196* 621.318.435.3:621.316.7:621.327.4 D1
 Williams C. E.: **Niektóre zagadnienia konstrukcji transduktorów ze szczególnym uwzględnieniem obwodów lamp próż-**

niowych. „Some aspects of transducer design with particular reference to discharge-lamp circuits”. Proc. Inst. El. Engrs., London, dwumies., t. 100, cz. 2, Nr 78, grud. 53, s. 667; A4, 7 str., 1 rys., 5 wyk., 1 tabl., 20 poz. bibl. — Zagadnienia związane z budową transduktorów do regulacji lamp próżniowych. Analiza optymalnych warunków pracy transduktora. Charakterystyki transduktora przy obciążeniu 80-watową lampą jarzeniową. Charakterystyki magnetyczne transduktora. Analiza charakterystyk magnetycznych transduktora. Wykorzystanie omówionych charakterystyk do konstrukcji transduktora o szerokim zakresie pracy. Niektóre dane doświadczalne z budowy transduktorów.

Zastosowanie elektrotechniki w przemyśle

621.34:621.9(083.74)

D1

Lottmann G.: **Nowe przepisy na wyposażenie elektryczne maszyn do obróbki i przerobu materiałów.** VDE 0113/...53. „Die neuen Regeln für die elektrische Ausrüstung von Bearbeitungs- und Verarbeitungsmaschinen. VDE 0113/...53”. Elektrotechnik (Berlin), Leipzig, mies., t. 7, Nr 11, list. 53, s. 550; A4, 4 str., 5 poz. bibl. — Porównanie nowych przepisów VDE na wyposażenie elektryczne obrabiarek z dawnymi, pochodzącymi z roku 1942, w szczególności w następujących pozycjach: stan izolacji, sposób umieszczenia aparatów elektrycznych na maszynie roboczej, sposób przyłączenia do sieci, zastosowanie różnych elementów aparatowych, w szczególności wyłączników, sposób wykonania instalacji sterującej, sygnalizacja i kolory umowne.

198* 621.34:621—523.338

D1

Zühlsdorf W.: **Podstawy techniki sterowania przy elektroautomatyzacji urządzeń przemysłowych.** „Einführung in die Grundlagen der Steuerungstechnik bei der Elektro-Automatisierung von Industrieanlagen”. Elektrotechnik (Berlin), Leipzig, mies., t. 7, Nr 4, kw. 53, s. 181; A4, 4,5 str., 6 rys. — Sterowanie przenośnikami taśmowymi rozpatrzone na przykładzie zespołu przenośników współpracujących. Układy sterowania kolejnościowego, w szczególności sterowanie programowe i sterowanie w funkcji kąta obrotu. Sygnalizacja świetlna. Przykłady układów sterujących. Zestawienie pojedynczych elementów w zespół zautomatyzowany.

Elektrotermia

199* 621.316.74:621.365

D1

James W.: **Nowa metoda ulepszonej regulacji temperatury pieców.** „A new method of improving furnace temperature control”. J. scienc. Instrum., London, mies., t. 31, Nr 1, stycz. 54, s. 23; A4, 3 str., 1 rys., 6 wyk., 4 poz. bibl. — Charakterystyka wahań temperatury w piecu. Mostkowy układ (uproszczony) do regulacji temperatury. Charakterystyka termistora zastosowanego w mostku. Charakterystyka zmian oporności termistora i termometru oporowego. Przykład regulacji i zapisu temperatury w piecu przy pomocy opisanego urządzenia.

200* 621.369.5:643.336:662.998

D1

Meyer E.: **Wpływ izolacji cieplnej na pobór prądu piekarników elektrycznych z regulatorem temperatury.** „Der Einfluss der Wärmeisolation auf den Stromverbrauch temperatureregelter Backöfen”. Elektrowärme Techn., Mindelheim, dwumies., Nr 1, luty 52, s. 14; A4, 3 str., 1 fot., 3 rys., 1 tabl. — Opis badań nad poprawą sprawności piekarników elektrycznych przez zastosowanie izolacji cieplnej. Różne materiały izolacyjne i ich własności. Wnioski.

Elektronika

201* 621.385:621.318.572:338.91

D1

Kretzmann R.: **Elektronowe urządzenia pomocnicze dla przemysłu.** „Elektronische Hilfsmittel für die Industrie”. E und M, Wien, 2-tyg., Nr 24, grud. 52, s. 543; A4, 6 str., 20 rys. — Zasada działania tyratronu w przekaźnikach elektronowych. Stosowanie prostowników wielkiej mocy. Układy sterowniczo-regulacyjne dla maszyn. Schematy i objaśnienia szeregu zastosowań automatyki elektronowej w przemyśle.

Rentgen

202* 537.531.8:620.18:621.386

D1

Splettstosser H. R., Seeman H. E.: **Wtórne promienie X w mikrorentgenografii metalurgicznej.** „Application of fluorescence X-rays to metallurgical microradiography”. J. appl. Phys., New-York, mies., t. 23, Nr 11, list. 52, s. 1217; A4, 6 str., 4 fot., 2 rys., 11 poz. bibl. — Promieniowanie wtórne bardziej jednolodne niż widmo prążkowe. Pomimo małych natężeń czasy napromieniowania nie przekraczają 30 min. Wpływ promieniowania wtórnego samej próbki. Opis metody i aparatury.

203* 537.531.8:620.18:621.386

D1

Koh P. K.: **Zastosowanie metalurgiczne wtórnych promieni X.** „Metallurgical Applications of X-ray fluorescent analysis”. J. appl. Phys., New-York, mies., t. 23, Nr 4, kw. 52, s. 427; A4, 6,5 str., 3 rys., 8 tabl., 6 poz. bibl. — Metoda przy użyciu goniometru z licznikiem Geigera. Wpływ zmiany potencjału, przygotowanie próbki i grubości kryształu. Porównanie promieniowania wtórnego czystych metali. Grubość graniczna dla stałości promieniowania wtórnego czystego żelaza, niklu i chromu.

Rozrząd zdalny

204* 621.398:621.316.1

D1

Steenbuch E.: **Projektowanie scentralizowanego rozrządu.** „Projektierung von Netzkommandoanlagen. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., t. 40, Nr 4, kw. 53, s. 131; A4, 6 str., 4 rys., 6 wyk., 2 tabl. — Analiza i wybór współczynników ważnych przy projektowaniu urządzeń sterowniczych. Obliczenia poszczególnych elementów urządzeń i sieci (transformatory, przewody-układy zastępcze i wykresy kołowe dla obliczenia oporności pozornej). Urządzenia nadawcze sterowania (napięcie, oporności linii, wybór częstotliwości, obciążenie). Specjalne elementy sieciowe, jak np. kondensatory do przesuwania fazy.

205* 621.398:621.316.1

D1

Quervain A.: **Odbiornik systemu centralnego rozrządu f-my Brown Boveri.** „Der Brown Boveri Netzkommandoempfänger”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., t. 40, Nr 4, kw. 53, s. 124; A4, 7 str., 3 fot., 3 rys., 4 wyk. — Zadania urządzeń do sterowania zdalnego. Rodzaje urządzeń. Opis elektronowego urządzenia do przetwarzania rozkazów sterowania. Budowa urządzenia. Niektóre elementy jak wybierak grupowy. Wykresy charakterystyczne dla pracy odbiornika. Elementy konstrukcyjne odbiornika. Zabezpieczenia przeciwko zakłóceniom w sieci. Dane techniczne odbiornika.

206* 621.3.052.63:621.395.395:621.398.2

D1

Kreiss O., Müller M.: **Pierwsza instalacja telefonii nośnej i ochrony zdalnej wielkiej częstotliwości na liniach wysokiego napięcia, dostarczona przez Brown Boveri do Kanady.** „Die erste von Brown Boveri nach Kanada gelieferte Anlage für EW-Telephonie über Hochspannungsleitungen und Schnelldistanzschutz mit Hochfrequenzkupplung”. Brown Boveri Mitt., Baden, mies., Nr 11/12, list.—grud. 53, s. 505; A4, 1,5 str., 3 fot. — Sterowanie zdalne i telekomunikacja przy pomocy przewodów linii 230 kV w Kanadzie. Sposób zainstalowania urządzeń wielkiej częstotliwości na rozdzielni i linii wysokiego napięcia. Instalacje wewnętrzne, szafy wielkiej częstotliwości. Zakres działania sterowania zdalnego.

Wiadomości ogólne

207* 621.3.015.53:537.527

D1

Foord T. R.: **Badania nad wyładowaniem ulotowym i iskrowym w układzie ostrze-dodatnie-płyta w sprężonych gazach.** „Some experiments on positive point-to-plane corona and spark breakdown of compressed gases”. Proc. Inst. El. Engrs., London, dwumies., t. 100, Nr 78, grud. 53, s. 585; A4, 6 str., 2 rys., 11 wyk., 17 poz. bibl. — Przedstawiono układ ciśnieniowy do badania sprężonych gazów do 70 atm. Zestawiono wyniki otrzymane przy pomiarze wytrzymałości dielektrycznej powietrza, N₂, CCl₂F₂, SF₆ oraz mieszaniny powyższych gazów. Stosowano układ: półkuliste ostrze-płyta; napięcie stałe. Zdjęto charakterystyki: prąd ulotu w funkcji napięcia dla niektórych gazów.

Niniejszy Przegląd Bibliograficzny zawiera jedynie część analiz dokumentacyjnych publikacji z zakresu elektrotechniki. Pełna dokumentacja ukazuje się w postaci kart dokumentacyjnych, wydawanych przez Centralny Instytut Dokumentacji Naukowo-Technicznej (Warszawa, Al. Niepodległości 188). CIDNT przyjmuje prenumeratę kart dokumentacyjnych, która może obejmować zarówno całą dokumentację naukowo-techniczną, jak i działy lub poszczególne zagadnienia i tematy techniczne.

CINDT wykonuje za zwrotem kosztów fotokopie i mikrofilmy publikacji objętych Przeglądem Dokumentacyjnym jak i kartami dokumentacyjnymi.

Warunki prenumeraty PRZEGLĄDU ELEKTROTECHNICZNEGO na rok 1955

I. Prenumerata normalna

Prenumerata normalna wynosi: kwartalnie 27 zł, półrocznie 54 zł, rocznie 108 zł.

Zgłoszenia na prenumeratę normalną przyjmują urzędy pocztowe oraz listonosze miejscy i wiejscy. Można również zgłosić prenumeratę normalną do PPK Ruch, Centralna Ekspedycja, Warszawa, Srebrna 12, przez wpłacenie należności na konto PKO — I 110/14000 z dokładnym podaniem nazwiska i adresu prenumeratora, okresu prenumeraty i tytułu czasopisma „Przegląd Elektrotechniczny”.

Termin zgłaszania prenumeraty normalnej na okres kwartalny, półroczny lub roczny upływa z dniem 10-tym miesiąca, poprzedzającego okres prenumeraty.

II. Prenumerata ulgowa

Prenumerata ulgowa wynosi kwartalnie zł 13,50, półrocznie zł 27.—, rocznie zł 54.—. Z prenumeraty ulgowej mogą korzystać przy zamówieniach zbiorowych członkowie stowarzyszeń naukowo-technicznych zrzeszonych w NOT, członkowie SARP, członkowie klubów techniki i racjonalizacji oraz studenci wyższych uczelni.

Zamówienia zbiorowe, imienne — z podaniem adresów, okresu prenumeraty i tytułu czasopisma „Przegląd Elektrotechniczny” oraz załączeniem należności — przyjmują koła zakładowe, od członków zaś niezrzeszonych w kołach — oddziały stowarzyszeń naukowo-technicznych, od studentów — koła naukowe uczelni.

Zamówienia zbiorowe należy przekazywać w podanych niżej terminach do PPK Ruch, Centralna Ekspedycja, Warszawa Srebrna 12, wpłacając jednocześnie należność na konto PKO — I — 110/14000.

Termin zgłaszania prenumeraty ulgowej: na II kwartał — do 1.III.55 r., na III kwartał — do 1.VI.55 r., na IV kwartał — do 1.IX.55 r.

MAŁY PORADNIK MECHANIKA

Wydanie 3 całkowicie przerobione i uzupełnione

Państwowe Wydawnictwa Techniczne

Format B6. s.792, liczne rysunki i tablice, cena zł 70.— (opraw.), nakład 60 000 egz.

Część 1. Nauki matematyczno-fizyczne. Matematyka, jednostki miar, tablice fizyczne, chemia, mechanika ogólna, wytrzymałość materiałów, hydromechanika, ciepło, elektrotechnika.

Część 2. Materiałoznawstwo.

Struktura stopów żelaza na tle wykresu żelazo-węgiel, obróbka cieplna stopów żelaza, zasadnicze pomiary stosowane przy obróbce cieplnej, surówki, żelazostopy, żeliwa, stale węglowe i stopowe, stellity i węgliki spiekane, metale

nieżelazne, stopy metali nieżelaznych, tablice wytworów hutniczych, materiały pomocnicze.

Część 3. Rysunek techniczny maszynowy.

Część 4. Części maszyn.

Połączenia, łożyskowanie, napędy, tolerancje i pasowania.

Część 5. Maszynoznawstwo.

Pompy, sprężarki, wentylatory, dźwignice i przenośniki.

Część 6. Różne.

PRZEGLĄD TECHNICZNY, organ główny NOT, nr 2/55, zawiera następujące artykuły: Pazdur J. Rola Przeglądu Technicznego w rozwoju polskiej techniki. — Pszenicki M. Wszelchwiązkowa narada pracowników budownictwa w Moskwie. — Libiszowski F. Metody produkcji elementów wielkopłytowych. — Hummel B., Bahr H., Bahr H. Zastosowanie w produkcji destylacyjnej metody suszenia drewna. — Kłopotowski W., Dobrowolski L. Sytuacja i perspektywy gospodarki przemysłowej surowcami wtórnymi. — Horszczaruk F. Zwiększenie produkcji pasz przemysłowych w świetle uchwały Prezydium Rządu. — Wiśniewski A. Aktualne zagadnienia kontroli technicznej w przemyśle maszynowym. — Wasiljew T. Czas uporządkować pojęcia i terminy organizacyjne w przedsiębiorstwie. — Nowiny techniczne z prasy zagranicznej. — Wolna Trybuna. — Sprawy organizacyjne NOT i stowarzyszeń. — Krytyka i bibliografia. — Kronika. — Biuletyn CIDNT. — Biuletyn GUM.

PRZEGLĄD TECHNICZNY, organ główny NOT, nr 3/55, zawiera następujące artykuły: Apel do inżynierów i techników świata. — Wierzbicki W. Ocena i wytyczne naszej pracy. — Rumiński B. Węzłowe zadania ruchu stowarzyszeń naukowo-technicznych na rok 1955. — Synowiec J. Tworzywa węglowe w budowie urządzeń przemysłowych. — W. K. Elektronowe maszyny liczące z lampami dekatronowymi. — Kłopotowski W., Dobrowolski L. Sytuacja i perspektywy gospodarki przemysłowymi surowcami wtórnymi (II). — Jakubowski J. L. Elektryfikacja Chin Ludowych. — Pazdur J. Rola Przeglądu Technicznego w rozwoju polskiej techniki (II). — Nowiny techniczne z prasy zagranicznej. — Wolna Trybuna. — Sprawy organizacyjne NOT i stowarzyszeń. — Krytyka i bibliografia. — Kronika. — Biuletyn CIDNT. — Przegląd dokumentacyjny zagadnień dokumentacji. — Przegląd dokumentacyjny metrologii.

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWA TECHNICZNE

Nowości wydawnicze

- BELŻECKA K., BELŻECKI C.: **Ćwiczenia z preparatyki organicznej.** S. 204, zł 9.50 (opraw.)
- BOSIACKI K., MARCINIAK Z., SEYNA F.: **Zarys tłocznictwa.** S. 327, zł 20.— (opraw.)
- CHMIELECKI A.: **Wulkanizacja opon i dętek.** S. 72, zł 3.—
- DOMANUS J.: **Budowa i obsługa elektrycznych grzejników do gotowania.** S. 80, zł 4.50
- DRABAREK A.: **Bezpieczeństwo i higiena pracy w laboratorium chemicznym.** Biblioteka Laboranta. S. 59, zł 2.50
- DUDIK K.: **Trasowanie w budowie maszyn.** S. 136, zł 7.—
- EFRUSSI M. M.: **Aparaty słuchowe dla słabo słyszących.** Tłum. z ros. J. Baranowski. Biblioteka Radiomechanika. S. 47, zł 2.50
- FILIPKOWSKI S.: **Wypadki przy pracy i choroby zawodowe.** Wiadomości podstawowe. Biblioteka Ochrony Pracy. S. 59, zł 3.—
- GIZIŃSKI B.: **Technologia wyrobów gumowych.** S. 236, zł 15.— (opraw.)
- GODLEWSKI Z.: **Wady odlewów żeliwnych.** S. 225, zł 18.— (opraw.)
- GÓRSKI E.: **Frezy. Konstrukcja.** Wyd. 2 popraw. i uzup. S. 200, zł 21.— (opraw.)
- HOLTORP J.: **Praca w odlewniach metali nieżelaznych.** Biblioteka Ochrony Pracy. S. 175, zł 8.50
- HUPERT L., WALTER K.: **Chemia techniczna.** S. 472, zł 26.— (opraw.)
- JESZCZERICYN P. I.: **Szlifowanie szybkościowe.** Tłum. z ros. T. Szafranski. S. 110, zł 8.—
- KACEJKO L.: **Sieci elektryczne wysokiego napięcia.** Wyd. 3. S. 472, zł 21.50 (opraw.)
- KARRER P.: **Chemia organiczna.** Tom 3. Tłum. z niem. W. Lampe, J. Świderski, J. Grochowski i T. Bartnikowski. S. 244, zł 25.—
- KASSENBERG K., RUCIŃSKI J.: **Elementy łączeniowe, sygnalizacyjne i zabezpieczające.** Tom 1. Wyd. 2. S. 235, zł 21.50
- KOMOROWSKI S.: **Piece odlewnicze.** Metalurgia dla odlewników. Tom 1. S. 328, zł 13.—
- Kontrola analityczna w przemyśle chemicznym. Tom. 3. Analiza produktów nieorganicznych. Kwas siarkowy. Nawozy fosforowe. Sole. Praca zbiorowa. S. 440, zł 46.50 (opraw.)
- LESZCZYŃSKI S.: **Obsługa pieców wapiennych i lasowników wapna.** Seria „Będę Fachowcem”. S. 59, zł 2.50
- ŁAZARKIEWICZ S.: **Obsługa pomp odśrodkowych.** S. 63, zł 2.50
- Mechanik. Poradnik techniczny. Praca zbiorowa pod red. A. T. Troskoleńskiego. Tom 5. Część 1. Organizacja zakładów przemysłowych. Wyd. 3 całkowicie przerob. S. 640, zł 57.— (opraw.)
- MERMON W.: **Praca na wiertarko-frezarkach.** S. 127, zł 11.—
- NOWAKOWSKI S.: **Zasady wietrzenia i ogrzewania zakładów pracy.** Wyd. 2. Biblioteka Ochrony pracy. S. 231, zł 15.60
- OCHĘDUSZKO K.: **Podzielnica uniwersalna.** S. 128, zł 8.—
- PASZKOWSKI M., RAUTENSTRAUCH S.: **Chemia organiczna.** S. 336, zł 19.50 (opraw.)
- POLAKOW K. A.: **Chemicznie odporne materiały niemetalowe.** Tłum. z ros. zespół. S. 399, zł 33.—
- RESZEL E.: **Modelarstwo.** Część 1. S. 170, zł 8.— (opraw.)
- SJERGIEJEW N. P., FEJGENSON M. S.: **Elektryczne zgrzewanie oporowe.** Tłum. z ros. S. Tomaszewski. S. 288, zł 16.—
- SUCHORZEWSKI T.: **Prasowanie tłoczyw fenolowych.** S. 59, zł 2.50
- SZOPSKI K.: **Obsługa pras mimośrodowych.** Seria „Będę Fachowcem”. S. 59, zł 2.—
- TATUR H., NOWAKOWSKI W.: **Jonity. Teoria i zastosowanie w przemyśle.** S. 200, zł 16.50 (opraw.)
- Urządzenia elektryczne w zarysie. Praca zbiorowa pod red. B. Walentynowicza. S. 492, zł 26.—
- WALCZYŃSKI J., DUTKIEWICZ Z.: **Zatrucia węglowodorami w przemyśle naftowym i ich zwalczanie.** S. 144, zł 10.50

Do nabycia w księgarniach technicznych Domu Książki i u kolporterów zakładowych

