

Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami wysokoprężnymi w elektrowniach jądrowych. Część 1

Emergency Diesel Generators in Nuclear Power Plants. Part 1

Jacek Nowicki

Państwowa Agencja Atomistyki, Departament Bezpieczeństwa Jądrowego, Wydział Oceny i Zezwoleń

Streszczenie: Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami Diesla są kluczowymi rezerwowymi źródłami zasilania w elektrowniach jądrowych, przede wszystkim w celu zapewnienia bezpiecznego wyłączenia reaktora w przypadku utraty zasilania zewnętrznego. Dostarczają one zasilanie do kluczowych systemów bezpieczeństwa, takich jak systemy chłodzenia rdzenia i systemy sterowania, zapobiegając uwolnieniu materiałów radioaktywnych. Zapasowe agregaty prądotwórcze są projektowane i testowane w taki sposób, aby były odporne na wstrząsy sejsmiczne i inne zakłócenia, zapewniając ich prawidłowe działanie w sytuacjach awaryjnych. W istocie urządzenia te stanowią jedną z ostatnich linii obrony w elektrowni jądrowej, chroniąc przed potencjalnymi zagrożeniami poprzez utrzymanie kluczowych systemów bezpieczeństwa w przypadku awarii innych źródeł zasilania.

Słowa kluczowe: Zapasowe agregaty prądotwórcze z silnikami Diesla, spalinowe silniki wysokoprężne, zasilanie zewnętrzne i miejscowe urządzeń energetycznego bloku jądrowego, bezpieczeństwo zasilania urządzeń elektrycznych klasy 1E.

Abstract: Emergency Diesel Generators (EDGs) are crucial backup power sources in nuclear power plants, primarily to ensure safe reactor shutdown in the event of a loss of external power. They provide power to key safety systems, such as reactor core cooling and control systems, preventing the release of radioactive materials. Backup generators are designed and tested to withstand seismic events and other disruptions, ensuring their proper operation in emergency situations. In essence, these devices constitute one of the last lines of defense in a nuclear power plant, protecting against potential threats by maintaining critical safety systems in the event of a failure of other power sources.

Keywords: Emergency Diesel Generators in nuclear power plants, internal combustion engines, offsite and onsite power supply of nuclear power plants, safety of power supply of Class 1E electrical equipment.

1. Wprowadzenie

Specyfika pracy elektrowni jądrowej wymaga zapewnienia potężnych **źródeł zasilania zapasowego** potrzeb własnych w celu spełnienia surowych rygorów bezpieczeństwa jądrowego. Podstawowym źródłem zasilania, z którego elektrownia jądrowa korzysta w sytuacji odstawienia bloku – gdy potrzeby własne nie są zasilane z własnego turbo-generatora, jest oczywiście **sieć energetyki zawodowej** wysokich i najwyższych napięć zapewniająca w normalnych warunkach dostęp do pewnego i stabilnego źródła zasilania [12]. Należy jednak uwzględnić przypadki, w których

zasilanie z tejże sieci może być niedostępne, na przykład na skutek poważnej awarii w systemie elektroenergetycznym. W takiej sytuacji konieczne jest korzystanie z miejscowych źródeł zasilania – tj. znajdujących się na terenie bloku energetycznego. Wśród nich wyróżnić można: **agregaty prądotwórcze prądu przemiennego** napędzane silnikami spalinowymi oraz **baterie akumulatorów prądu stałego**. Począwszy od pierwszej generacji elektrowni jądrowych w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, rolę podstawowych źródeł zasilania zapasowego prądu przemiennego odgrywają agregaty

prądowórcze napędzane spalinowymi silnikami wysokoprężnymi, które w sytuacji awaryjnego wyłączenia bloku energetycznego są w stanie zapewnić dostępność energii elektrycznej przede wszystkim dla pracy systemów odbierających ciepło powyłączeniowe z reaktora jądrowego.

Agregaty zasilania zapasowego w elektrowniach jądrowych są w istocie mniejszymi, kompletnymi i autonomicznymi elektrowniami. Pewność rozruchu i pracy zapasowych agregatów prądowórczych są czynnikami o podstawowym znaczeniu dla energetycznych bloków jądrowych II generacji, stanowiących większość eksploatowanych obecnie elektrowni jądrowych na świecie. Zapewniają one zasilanie prądem przemiennym kluczowych układów związanych z bezpieczeństwem jądrowym w sytuacji zaniku zasilania z głównego generatora blokowego oraz niedostępności zasilania z zewnętrznej sieci energetyki zawodowej.

Warto tu zwrócić uwagę, że w elektrowniach jądrowych I i II generacji wyposażonych w aktywne układy bezpieczeństwa zapewnienie pewności zasilania prądu przemiennego z agregatów prądowórczych stanowiło wymaganie o absolutnie pierwszoplanowym znaczeniu. W części spośród dużych energetycznych bloków jądrowych generacji III i III+, których projekty uwzględniają postulaty bezpieczeństwa pasywnego, dla działania układów odbioru ciepła powyłączeniowego z reaktora dostępność zasilania z zewnętrznych lub miejscowych źródeł zasilania elektrycznego o dużej mocy nie jest już warunkiem koniecznym. Przykładami takich rozwiązań są np. duże bloki energetyczne AP1000 i ESBWR (o mocy rzędu 1–1,5 GW) i bloki bazujące na małych reaktorach modułowych SMR (<300 MW) – np. BWRX-300. Inne rozwiązania generacji III/III+, jak np. EPR opierają się na aktywnych systemach bezpieczeństwa i wymagają w sytuacjach awaryjnych wielokrotnionego zasilania elektrycznego dużej mocy z agregatów prądowórczych. W każdym jednak przypadku rezerwowe agregaty prądowórcze są i będą w przewidywalnej przyszłości nadal nieodłącznymi elementami wyposażenia każdego obiektu energetyki jądrowej.

2. Dlaczego agregaty dieslowskie?

Agregaty prądowórcze stosowane w elektrowniach jądrowych są *de facto* same w sobie sporymi elektrowniami złożonymi z silników napędowych, generatorów elektrycznych, układów rozruchowych, paliwowych, rozdzielczych i zabezpieczeniowych, przeznaczonymi do specyficznego zastosowania zapewnienia zasilania zapasowego niezbędnych systemów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego w sytuacji awaryjnej. Choć możliwe bywa tu zastosowanie innych źródeł zasilania zapasowego o dużej mocy – np. hydrogeneratorów lub generatorów napędzanych turbinami gazowymi (o czym będzie jeszcze mowa w drugiej części tego artykułu), to jednak agregaty napędzane silnikami wysokoprężnymi stały się dominującym

rozwiązaniem technicznym [11, 13]. Zadecydowała o tym przede wszystkim dojrzałość techniczna napędu dieslowskiego bazująca na doświadczeniach zdobytych od przełomu XIX i XX stulecia w cywilnych i wojskowych zastosowaniach w pojazdach lądowych oraz napędach morskich, a także stacjonarnych elektrowniach. Pierwsze morskie reaktory napędowe dla okrętów podwodnych powstawały w Stanach Zjednoczonych na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych w środowiskach konstruktorów, którym morskie układy napędów diesel-elektrycznych były doskonale znane. Z wysoką dozą pewności można uznać, że wyjątkowa pozycja agregatów z silnikami wysokoprężnymi w wojskowej i cywilnej energetyce jądrowej miała swoje korzenie właśnie w tym czasie i miejscu.

Dwa podstawowe czynniki zadecydowały o powszechnym użyciu agregatów z silnikami Diesla w układach zasilania awaryjnego elektrowni jądrowych, jeszcze w początkowym okresie rozwoju energetyki jądrowej w USA:

1. Na podstawie możliwych scenariuszy awarii określono, jak szybko musi być dostarczone zasilanie elektryczne dla układu zapasowego chłodzenia rdzenia reaktora (ang. *Emergency Core Cooling System* – ECCS), aby uniknąć jego przegrzania. Wiele spośród wczesnych reaktorów jądrowych wymagało włączenia zasilania dla układu zapasowego chłodzenia rdzenia w ciągu zaledwie 15 do 30 sekund. W celu zachowania marginesu bezpieczeństwa przyjęto wówczas, że maksymalne opóźnienie w dostarczeniu napięcia z rezerwowego źródła zasilania dla odbiorników energii elektrycznej, jakie muszą zostać zasilone w pierwszej kolejności, nie może przekraczać 10 sekund. Dalsze odbiory podłączane były do zapasowego źródła zasilania stopniowo, zgodnie z ustaloną sekwencją.
2. Uznano, że agregaty dieslowskie są dostatecznie niezawodnymi źródłami energii elektrycznej zdolnymi do bardzo szybkiego rozruchu i szybkiego przejścia dużego obciążenia. Dodatkowym argumentem było zastosowanie analogicznego układu w pierwszych siłowniach jądrowych budowanych na potrzeby wojskowych napędów okrętowych.

W porównaniu z innymi silnikami spalinowymi silnik wysokoprężny oferuje szereg zalet, w tym [11, 13]:

- wysoką niezawodność działania i niskie ryzyko pożaru;
- możliwość pracy ciągłej przez długi czas;
- względnie niskie koszty paliwa, wysoką sprawność i niskie zużycie paliwa na jednostkę czasu;
- wysoką osiąganą moc na jednostkę masy silnika dzięki czemu stosunek gabarytów do masy tych urządzeń jest bardzo korzystny;
- wysoki stały moment obrotowy;
- możliwość bardzo szybkiego rozruchu: w zależności od mocy i konfiguracji jednostki jest to od kilku-kilkunastu sekund do 1–2 minut;
- względnie niewielkie wymagania dotyczące układów chłodzenia.

3. Wysokoprężny silnik spalinowy

Silniki cieplne, tłokowe o spalaniu wewnętrznym i zapłonie samoczynnym, w których ciśnienie maksymalne czynnika jest znacznie wyższe niż w silnikach niskoprężnych (np. o zapłonie iskrowym), nazywane są silnikami wysokoprężnymi lub silnikami Diesla, od nazwiska swego wynalazcy: **Rudolfa Diesla** (1858–1913) – patrz rysunek 1. Diesel rozpoczął prace nad swoim silnikiem już w 1889 roku i złożył w Cesarskim Urzędzie Patentowym w Berlinie odpowiedni wniosek w lutym 1892 roku. Rezultaty jego rozważań inżynierskich zostały przedstawione w wydanej w 1893 roku książce zatytułowanej „Teoria i konstrukcja racjonalnych silników cieplnych mogących zastąpić silniki parowe i znane obecnie silniki spalinowe” (niem. *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren*). W latach 1893–1897 w zakładach Maschinenfabrik Augsburg AG należących do Heinricha Buza powstał prototyp silnika wysokoprężnego. Prace nad nim sfinansowało przedsiębiorstwo Kruppa. Silnik konstrukcji Rudolfa Diesla nie tylko przyniósł swemu twórcy ogromną sławę i bogactwo, ale przede wszystkim zrewolucjonizował w kolejnych dziesięcioleciach wiele dziedzin transportu i energetyki. Nazwa „diesel” (pisana małą lub wielką literą) weszła do większości języków świata jako określenie



Rys. 1. Rudolf Diesel (1858–1913) – twórca spalinowego silnika wysokoprężnego (fot. domena publiczna).

Fig. 1. Rudolf Diesel (1858–1913) – inventor of the internal combustion compression-ignition engine engine (source: public domain).

spalinowego silnika wysokoprężnego i stosowanego w nim paliwa: oleju napędowego będącego mieszaniną węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych uzyskiwaną w procesie destylacji surowej ropy naftowej.

W silniku Diesla energia chemiczna zawarta w oleju napędowym jest przekształcana w energię cieplną w procesie spalania. Energia cieplna zawarta w gorących gazach spalinowych jest przekształcana w energię mechaniczną poprzez ich rozprężanie i chłodzenie. W ten sposób powstają siły działające na tłoki, korbowody i wał korbowy. Te podzespoły przekształcają liniowy, posuwisto-zwrotny ruch tłoków na ruch obrotowy wału korbowego. Spalanie w silniku wysokoprężnym jest reakcją chemiczną pomiędzy: wodorem oraz węglem (wchodzącymi w skład paliwa węglowodorowego) a tlenem (dostarczany wraz z powietrzem atmosferycznym), w wyniku której uwalniana jest energia w postaci ciepła. Dla skutecznego zapłonu muszą być obecne trzy kluczowe elementy: paliwo, tlen oraz wysokie ciśnienie i wysoka temperatura wewnątrz cylindra. Wyeliminowanie któregośkolwiek z nich uniemożliwia proces spalania.

- **Paliwo** – olej napędowy, dostarcza energię dla reakcji chemicznej spalania. W cylindrach silnika energia chemiczna paliwa jest przekształcana w energię cieplną. Średnio olej napędowy odznacza się wartością opałową od 42 do 44 MJ/kg.
- **Tlen** z powietrza atmosferycznego jest drugim kluczowym elementem procesu spalania. Łączy się on z węglem i wodorem zawartym w paliwie, wytwarzając gazy spalinowe i ciepło.
- Zasadą działania tłokowego silnika wysokoprężnego jest sprężanie powietrza wewnątrz cylindrów do **wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury**, przekraczającej temperaturę zapłonu paliwa. Nie ma tu ryzyka samozapłonu, ponieważ sprężaniu podlega samo powietrze, zaś rozpylona mieszanka paliwowa dostarczana jest dopiero w chwili, kiedy ma się rozpocząć jej spalanie. Zapłon następuje zatem samoczynnie, bez inicjowania go za pomocą iskry elektrycznej, jak to ma miejsce w klasycznych silnikach Otto (np. w benzynowym silniku gaźnikowym). Paliwo wtryskiwane do silnika powinno odznaczać się szybkim i łatwym zapłonem w temperaturze, jaka panuje po sprężeniu powietrza [13].

Współcześnie spalinowe silniki wysokoprężne osiągają moce od kilkudziesięciu koni mechanicznych ($1 \text{ kW} = 1,36 \text{ KM}$) w przypadku konstrukcji czterocylindrowych stosowanych do napędu mniejszych samochodów osobowych do ponad 100 tysięcy KM (ponad 80 MW) w przypadku największych, kilkunastocylindrowych jednostek przeznaczonych dla układów napędowych dużych statków morskich, np. tankowców lub kontenerowców.

Silniki Diesla stosowane w zapasowych układach zasilania elektrowni jądrowych pozwalają na uzyskiwanie mocy rzędu od kilku do kilkunastu megawatów. Pod

względem osiąganych mocy, rozmiarów i większości rozwiązań konstrukcyjnych są one zatem zbliżone do silników spalinowych stosowanych w okrętach podwodnych o napędzie konwencjonalnym (diesel-elektrycznym), a także w dużych lokomotywach spalinowych.

Typowym rozwiązaniem jest tu silnik widlasty, wielocylindrowy rzędowy, w którym cylindry umieszczone są w dwóch rzędach pod określonym kątem wobec siebie. Tłoki w obu rzędach cylindrów połączone są korbowodami ze wspólnym wałem korbowym. Układ widlasty silnika oprócz zwartej konstrukcji pozwala na duże pojemności skokowe cylindrów i tym samym uzyskanie wysokiej mocy. Stosowane są konfiguracje 12-, 14-, 16-, 18-, 20-cylindrowe. Znamionowa prędkość obrotowa, w zależności od typu silnika, wynosi od 600 do 1000 obr./min.

Stosowane są dwa typowe rozwiązania konstrukcyjne silników wysokoprężnych: dwusuwowe i czterosuwowe. Silniki Diesla czterosuwowe są najbardziej rozpowszechnione w większości zastosowań od najmniejszych do największych mocy znamionowych, począwszy od napędów samochodowych, a skończywszy na wielkich napędach morskich i przemysłowych agregatach prądowórczych. Wysokoprężne silniki dwusuwowe, w porównaniu do czterosuwowych, mają tendencję do generowania większej ilości zanieczyszczeń, co ogranicza ich zastosowanie w aplikacjach o mniejszej mocy znamionowej, np. w napędach samochodowych, gdzie obowiązują surowe normy emisji spalin. Odznaczają się one wysoką mocą na jednostkę masy i prostszą konstrukcją.

W czterosuwowym silniku wysokoprężnym wszystkie zdarzenia zachodzą podczas czterech suwów tłoka lub dwóch obrotów wału korbowego. Zaczynając od tłoka w górnym punkcie suwu i otwartego zaworu dolotowego powietrza, tłok przesuwa się w dół, zasysając powietrze do cylindra. Krótco po osiągnięciu przez tłok dolnego punktu suwu zawór dolotowy powietrza zamyka się. Gdy tłok porusza się w górę, cylinder zostaje uszczelniony, a powietrze sprężone. Temperatura powietrza wzrasta w miarę sprężania, a paliwo jest wtryskiwane na krótko przed osiągnięciem przez tłok górnego punktu suwu. Paliwo jest natychmiast zapalane przez gorące powietrze i rozpoczyna się jego spalanie. Pod wpływem ciepła spalania gazy rozprężają się i dociskają tłok w dół podczas suwu pracy. Tuż przed końcem suwu otwiera się zawór wydechowy, który pozostaje otwarty przez cały suw wydechu. Zawory dolotowe powietrza otwierają się pod koniec suwu wydechu, umożliwiając napływającemu powietrzu oczyszczenie cylindra ze spalin i wspomaganie chłodzenia.

Cykl dwusuwowy składa się z suwu w dół i suwu w górę. Każdy suw w dół obejmuje fazę pracy, a każdy suw w górę fazę sprężania. W dwusuwowym silniku wysokoprężnym oba zawory w górnej części cylindra są zaworami wydechowymi. Kanały dolotowe powietrza (otwory) w dolnej ścianie cylindra są otwierane lub zamykane

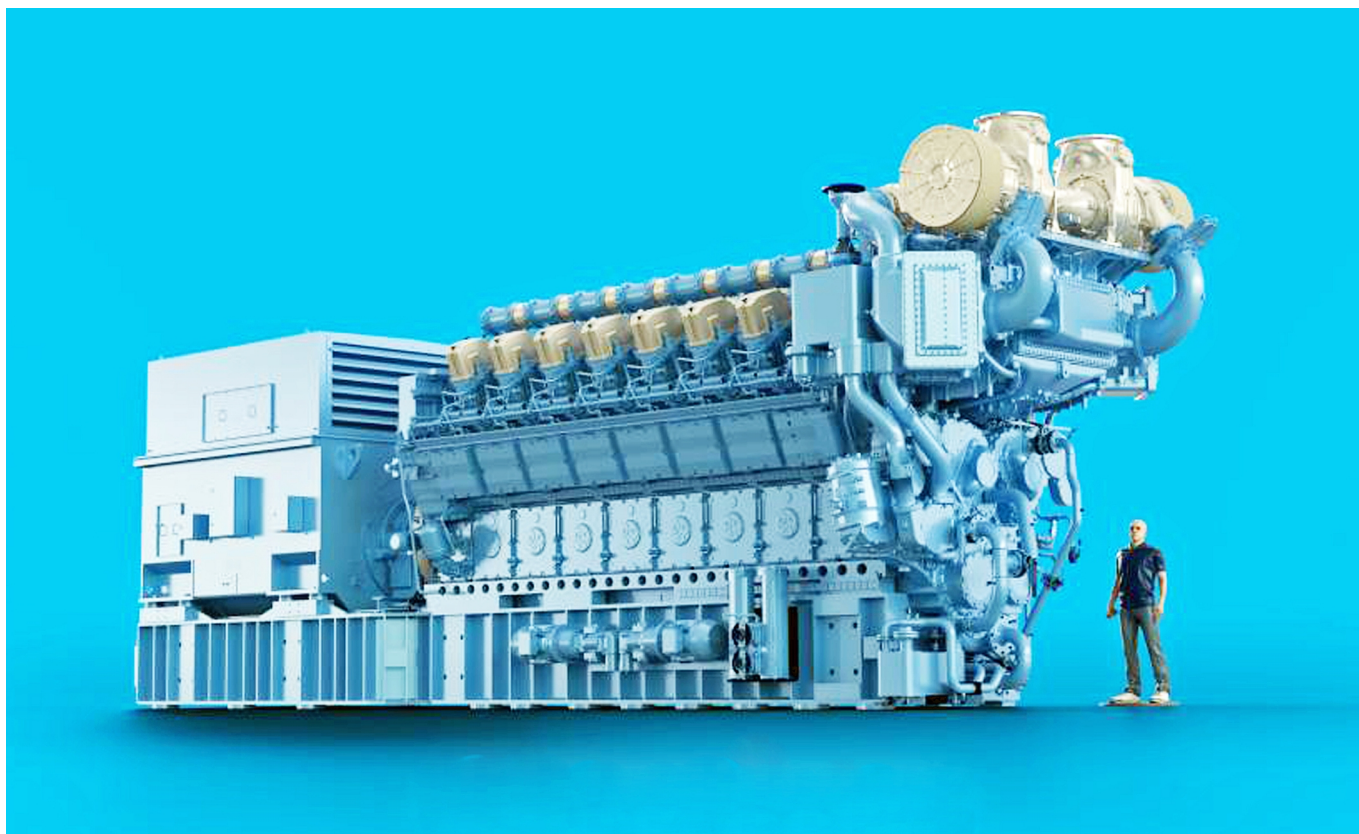
w zależności od położenia tłoka w cylindrze. Gdy tłok znajduje się blisko dna między suwami, kanały dolotowe są otwarte, a powietrze jest wtłaczane do cylindra przez dmuchawę (pompę powietrza). Świeże powietrze wpadające do cylindra wypycha (przedmucha) resztkowe gazy spalinowe z jego wnętrza przez otwarte zawory wydechowe. Zatem cykl dwusuwowy łączy funkcję przedmuchu spalin i dolotu powietrza wokół dolnego martwego punktu cyklu. W miarę jak tłok unosi się, zawory wydechowe zamykają się, a dmuchawa tłoczy dodatkowe powietrze przez kanały dolotowe, powodując wzrost ciśnienia powietrza w cylindrze powyżej ciśnienia atmosferycznego (doładowanie). W miarę jak tłok unosi się, kanały dolotowe zamykają się, a ciągły ruch tłoka w górę spręża powietrze w cylindrze. Gdy tłok zbliża się do górnej części suwu w górę, wtryskiwacz wtryskuje paliwo do cylindra. Mieszanka paliwowo-powietrzna zapala się pod wpływem ciepła wytworzonego podczas sprężania powietrza. Proces spalania powoduje gwałtowny wzrost temperatury i ciśnienia gazu w cylindrze, co powoduje popychanie tłoka w dół. Rozprężający się gaz działa na tłok, wytwarzając moc mechaniczną.

4. Zabudowa, układy i podzespoły agregatu prądowórczego

W energetycznym bloku jądrowym agregaty prądowórcze instalowane są na ogół w oddzielnych budynkach znajdujących się w bezpośredniej bliskości zabudowań wysp jądrowej i turbinowej. Takie odseparowanie pozytywnie wpływa na podwyższenie bezpieczeństwa i ułatwia dostęp do agregatów w sytuacjach awaryjnych. Jeżeli w budynku zabudowane są dwie jednostki prądowórcze, wówczas oddziela się je tzw. ścianą ogniową (ang. *firewall*), chroniącą przed rozprzestrzenieniem się ognia na drugą jednostkę w przypadku pożaru pierwszej. Budynki mieszczące agregaty są niejednokrotnie rozmieszczane po przeciwnych stronach wyspy jądrowej, tak aby zapewnić dodatkową redundancję na wypadek uderzenia statku powietrznego.

Wysokoprężny silnik spalinowy zabudowany jest na ogół na wspólnej konstrukcji wsporczej z napędzanym przez niego generatorem elektrycznym wraz z łączącym je sprzęgłem na wale oraz kołem zamachowym (patrz rysunek 2). Większość spośród układów i podzespołów niezbędnych do działania agregatu znajduje się wewnątrz budynku, w którym jest on zainstalowany.

Konfiguracja układów zasilania awaryjnego w elektrowni jądrowej zapewniać musi niezbędną redundancję. Z zasady powinny być stosowane co najmniej dwa wzajemnie rezerwujące się układy, choć bywa stosowane zwielokrotnienie trzy- lub czterokrotne. W blokach z reaktorami wodno-ciśnieniowymi typu EPR i APR-1400 zastosowano aż cztery duże jednostki agregatów prądo-



Rys. 2. Agregat prądowórczy zasilania zapasowego dla elektrowni jądrowej: zespół silnika wysokoprężnego i generatora synchronicznego zabudowany na wspólnej konstrukcji wsporczej (rys. Électricité de France / Eiffage / SPIESPIE Nucléaire).

Fig. 2. Emergency Diesel Generator for a nuclear power plant: a diesel engine and synchronous generator assembly mounted on a common support structure (source: Électricité de France / Eiffage / SPIESPIE Nucléaire).

twórczych o mocy kilku megawatów każdy uzupełnione o dwie mniejsze jednostki (razem aż 6 agregatów). W przypadku bloku EPR cztery większe jednostki mają moc znamionową po 7,8 MW każda, a dwie mniejsze po 3 MW każda. W bloku AP1000, którego konstrukcja w pełnijszy sposób spełnia postulaty dla pasywnego chłodzenia reaktora, zastosowano tylko dwa duże agregaty prądowórcze o mocy „megawatowej” uzupełnione dwoma małymi agregatami pomocniczymi. Są one zainstalowane w przeznaczonym do tego celu budynku (patrz rysunek 3) na zewnątrz głównych zabudowań bloku jądrowego na dwóch stanowiskach rozdzielonych ścianą o wysokiej odporności ogniowej. W blokach typu AP1000 Vogtle 3 i 4 zastosowano agregaty ESDG (ang. *Emergency Standby Diesel Generator*) firmy Caterpillar-Milton typu CAT C280-16 z 16-cylindrowymi silnikami wysokoprężnymi (patrz rysunek 4). Moc znamionowa ciągu zespołu prądowórczego wynosi 5200 kW, moc maksymalna dysponowana 5720 kW, znamionowa prędkość obrotowa 900 obr./min. Generator synchroniczny Kato/Emerson wytwarza prąd przemienny trójfazowy o napięciu 6900 V (6,9 kV) i częstotliwości 60 Hz.

Warto tu zauważyć, że w blokach jądrowych II generacji o podobnej mocy znamionowej jak współczesne AP1000 stosowano w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. znacznie mocniejsze agregaty prądowórcze, ze

względem do realizowanych przez nie funkcji bezpieczeństwa jądrowego. Na przykład w sąsiednich blokach Vogtle 1 i 2 zainstalowane są jednostki Delaval Entreprise o jednostkowej mocy elektrycznej aż 7,7 MW. Są to jedne z największych agregatów prądowórczych w amerykańskiej energetyce jądrowej.

Oprócz dużych agregatów klasy „megawatowej” współczesny blok jądrowy wyposażony jest w pomocnicze zespoły prądowórcze. Na przykład w blokach Vogtle 3 i 4 w budynku gospodarki odpadami promieniotwórczymi (ang. *Radwaste Building*) znajdują się dwa agregaty ADGU (ang. *Ancillary Diesel Generator Unit*) o mocy 80 kW każdy, produkcji Caterpillar-Milton, 480 V/60 Hz przeznaczone w razie konieczności do dostarczania energii przez czas do 72 h do odbiorników nie związanych z bezpieczeństwem (*non-Class 1E*) – patrz rysunek 5.

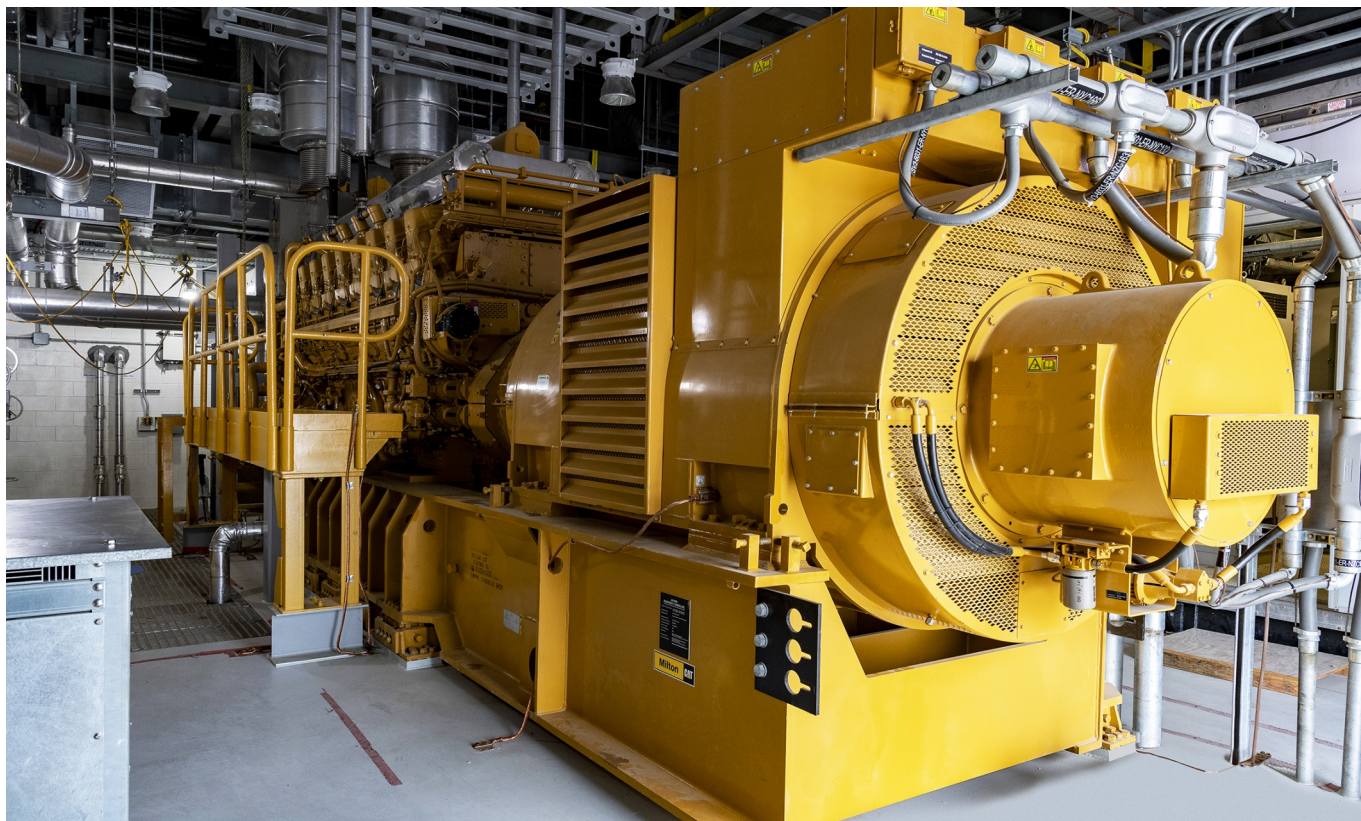
Doświadczenia wynikłe z katastrofy w Fukushima spowodowały wprowadzenie nowych wymagań dla wyprowadzenia przyłączy do głównych szyn rozdzielnic zasilających potrzeby własne na zewnątrz budynków bloku elektrowni. Tego rodzaju zewnętrzne przyłącza elektryczne pozwalają na podłączenie przewoźnych agregatów prądowórczych, jakie w sytuacji awaryjnej mogłyby zostać dostarczone spoza terenu elektrowni.

W kolejnych punktach poniżej omówione zostaną poszczególne układy pomocnicze zapasowych agregatów



Rys. 3. Budynek zapasowych agregatów prądowłórczych bloku jądrowego Vogtle 4 podczas budowy w marcu 2022 r. (fot. Georgia Power Company).

Fig. 3. Diesel generators building in the Vogtle 4 nuclear power unit during construction in March 2022 (source: Georgia Power Company).



Rys. 4. Agregat prądowłórczy Caterpillar-Milton typu CAT C280-16 z 16-cylindrowym silnikiem wysokoprężnym zainstalowany w energetycznym bloku jądrowym Vogtle 3 (fot. Georgia Power Company).

Fig. 4. Caterpillar-Milton CAT C280-16 genset unit with a 16-cylinder diesel engine installed in a nuclear power plant Vogtle 3 (source: Georgia Power Company).



Rys. 5. Ogólny widok energetycznych bloków jądrowych nr 3 (z lewej) i 4 (z prawej) w elektrowni Alvin W. Vogtle Electric Generating Plant w Waynesboro w Georgii – najnowszych w energetyce amerykańskiej: A – budynki agregatów prądotwórczych – w każdym zainstalowane są dwie jednostki ESDG, każda o mocy 5,72 MW; B – główne zewnętrzne zbiorniki paliwa do agregatów – każdy o pojemności 227 100 dm³, C – miejsce zainstalowania mniejszych agregatów ADGU – w każdym bloku 2 jednostki, każda o mocy 80 kW (fot. Georgia Power Company, odnośniki autora).

Fig. 5. General view of Units 3 (left) and 4 (right) at the Alvin W. Vogtle Electric Generating Plant in Waynesboro, Georgia – the newest plant in the U.S. nuclear power inventory: A – generator buildings – each with two ESDG units installed, each with a capacity of 5.72 MW; B – main external fuel tanks for the generators – each with a capacity of 227 100 liters; C – installation location for smaller ADGU generators – each unit with two units, each with a capacity of 80 kW (source: Georgia Power Company, author's references).

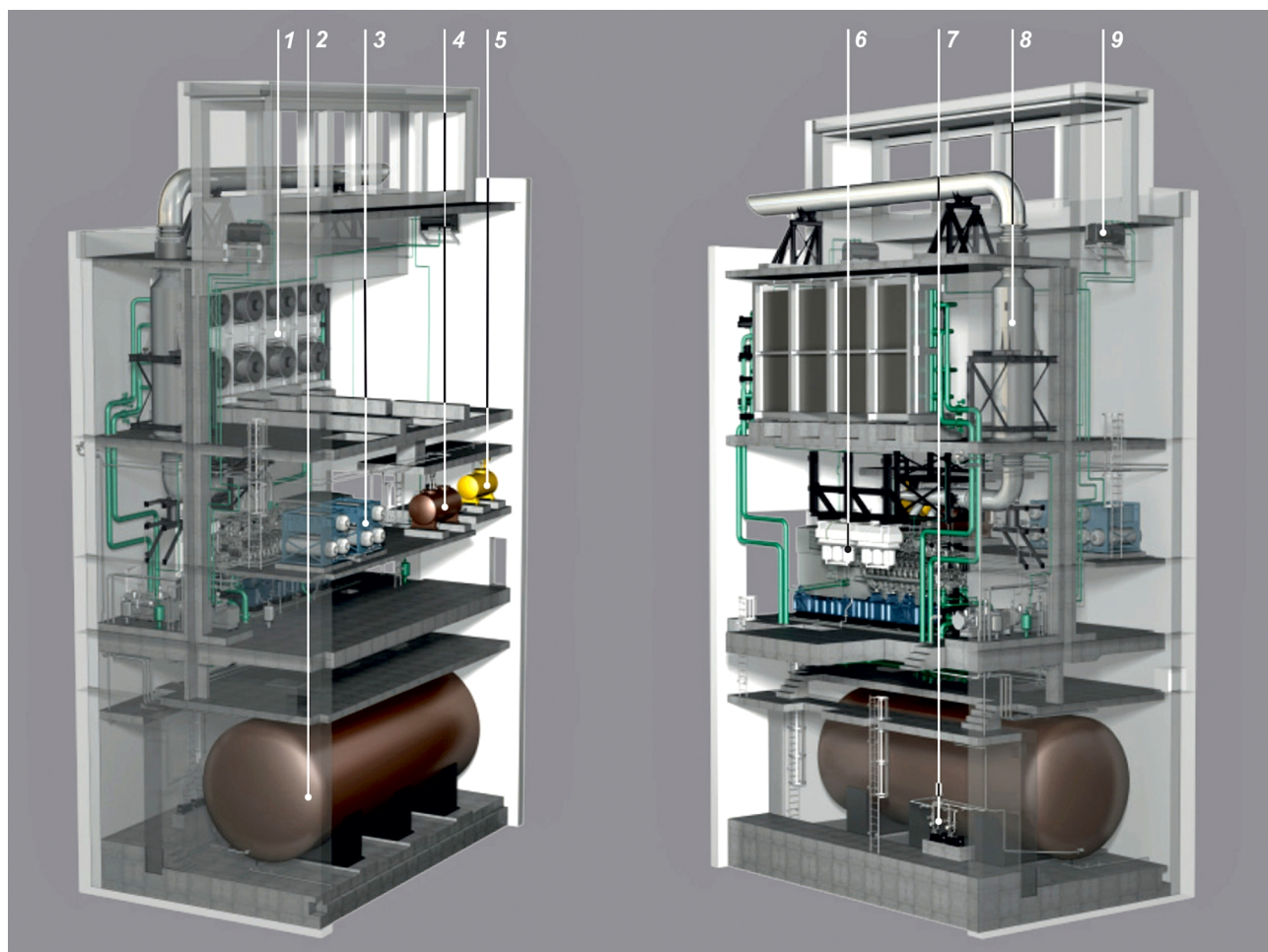
prądotwórczych stosowanych w elektrowniach jądrowych. Na rysunku 6 pokazany jest przykład zabudowy dużego agregatu prądotwórczego bloku jądrowego firmy MTU wraz z instalacjami towarzyszącymi. Z kolei na rysunku 7 pokazany jest schemat blokowy podstawowych systemów zapasowego agregatu prądotwórczego dla energetycznego bloku jądrowego.

4.1. Układ rozruchowy

Zadaniem układu rozruchowego jest zainicjowanie pracy agregatu poprzez zapewnienie odpowiednich warunków wewnątrz cylindrów silnika spalinowego celu zapoczątkowania spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Rozruch silnika dokonuje się poprzez wielokrotne obrócenie wału korbowego silnika i nadanie mu odpowiedniej prędkości obrotowej, przy której może on rozpocząć samodzielną pracę. Wykonanie kilku – kilkunastu obrotów pozwala na osiągnięcie wymaganej prędkości obrotowej, przy której wewnątrz cylindrów podczas suwu sprężania powstaje ciśnienie konieczne do samozapłonu mieszanki paliwowej. W większości agregatów prądotwórczych stosowanych w aplikacjach jądrowych wykorzystuje się układy sprężonego powietrza zmagazynowanego w zbiornikach ciśnieniowych. Źródłem energii elektrycznej dla układu sterowania oraz układu wzbudzenia generatora synchronicznego w fazie rozruchu jest bateria akumulatorów. Do zapewnienia wysokich kryteriów niezawodnościowych

objętość zbiorników sprężonego powietrza powinna być wystarczająca dla przeprowadzenia kilku rozruchów bez doładowywania (w przypadku agregatów zastosowanych w blokach Vogtle 3 i 4 są to trzy próby rozruchu).

Najszerzej stosowanym systemem rozruchu pneumatycznego w awaryjnych generatorach diesla elektrowni jądrowych jest **układ doprowadzający sprężone powietrze bezpośrednio do cylindrów**. W tej metodzie rozruchu zawory rozdzielcze wysyłają strumienie sprężonego powietrza do cylindrów silnika w kolejności, w jakiej podczas pracy ciągłej silnika następują kolejne zapłony mieszanki paliwowo-powietrznej. Sprężone powietrze popycha tłoki w odpowiedniej kolejności, powodując obrót wału korbowego. Odmiany tej metody obejmują pojedyncze zawory rozdzielcze wielodrożne oraz pojedyncze zawory zasilające poszczególne cylindry, których otwieranie i zamykanie jest sterowane przez przekładnię zębatą sprzężoną z wałem korbowym silnika. Efektem końcowym obu metod jest szybki obrót wału korbowego i wytworzenie odpowiedniego ciśnienia i temperatury w cylindrach, aby zapalić paliwo po jego dostarczeniu. Stosowane w tych układach elektrozawory (zamykane i otwierane za pomocą elektromagnesów) sterują dopływem sprężonego powietrza i zasilane są z baterii akumulatorów. Odpowiednia redundancja w systemie zapewniona jest poprzez zwielokrotnienie zbiorników sprężonego powietrza i układów zasilania prądem stałym. W sytuacji, w której wszystkie układy są sprawne, do uruchomienia silnika wysoko-



Rys. 6. Zabudowa agregatu prądotwórczego, wraz instalacjami towarzyszącymi, w dużym energetycznym bloku jądrowym: 1 – wentylatory układu chłodzenia; 2 – główny zbiornik paliwa; 3 – zbiorniki sprężonego powietrza dla układów rozruchu; 4 – pomocniczy zbiornik paliwa; 5 – zbiornik oleju układu smarowania; 6 – silnik wysokoprężny i generator; 7 – pompa paliwowa; 8 – tłumik gazów spalinowych układu wydechowego; 9 – zbiornik wyrównawczy układu chłodzenia (rys. MTU Onsite Energy, Rolls-Royce Power Systems).

Fig. 6. Generator installation, along with associated installations, in a large nuclear power unit: 1 – cooling system fans; 2 – main fuel tank; 3 – compressed air tanks for Diesel engine starting systems; 4 – auxiliary fuel tank; 5 – lubrication system oil tank; 6 – Diesel engine and generator; 7 – fuel pump; 8 – exhaust gas silencer; 9 – cooling system expansion tank (source: MTU Onsite Energy, Rolls-Royce Power Systems).

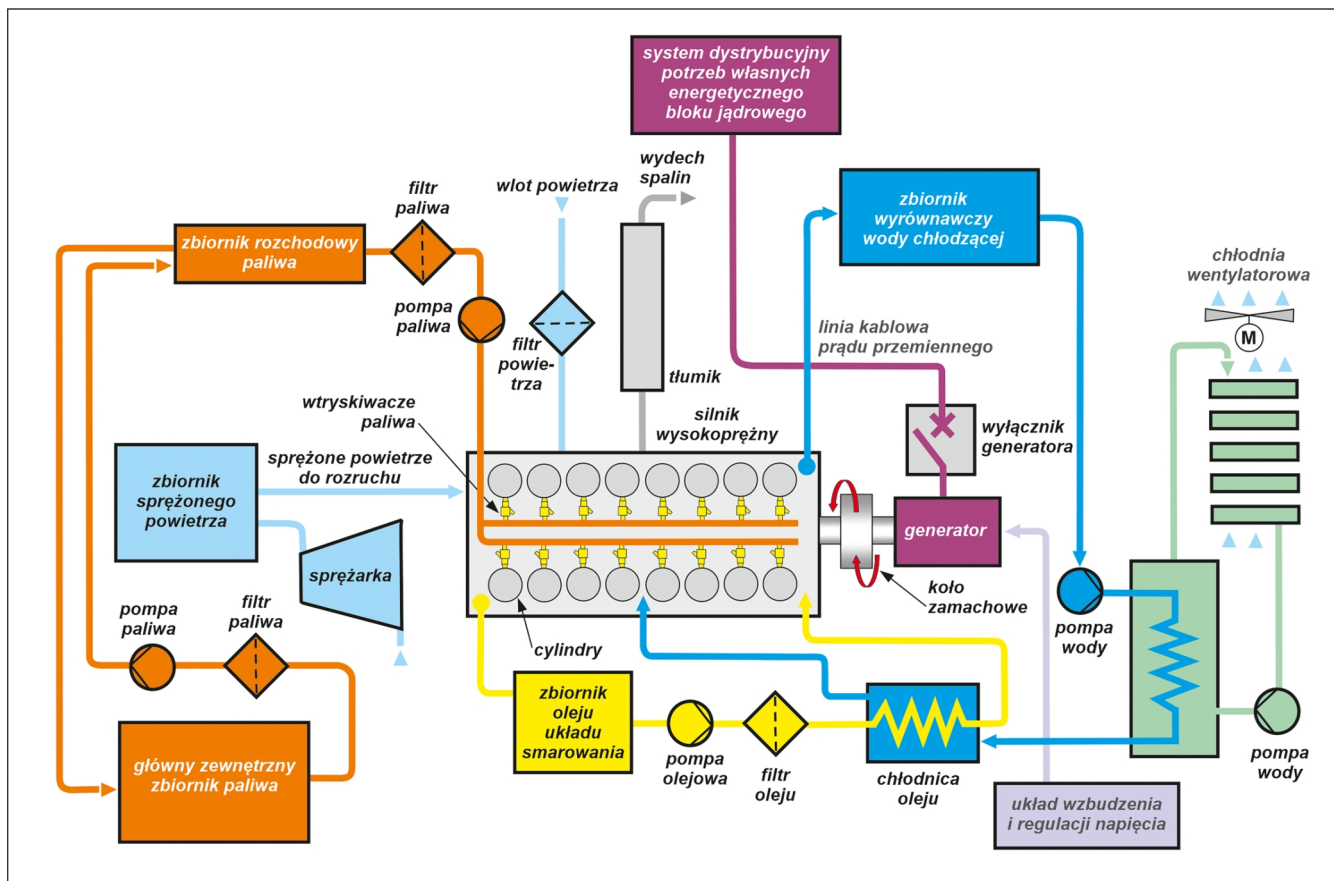
prężnego potrzebna jest zaledwie połowa dostępnej mocy układu rozruchu pneumatycznego.

W niektórych typach agregatów stosuje się **układy rozruchowe z silnikami pneumatycznymi**. Pod względem zasady działania są one podobne do typowych pneumatycznych napędów przemysłowych używanych np. do napędu wiertarek, kluczy do połączeń śrubowych, podnośników itp. Po doprowadzeniu powietrza do silnika pneumatycznego jego wirnik zaczyna się obracać. Oś silnika pneumatycznego łączy się wówczas poprzez przekładnię zębatą z wałem silnika wysokoprężnego. Gdy prędkość obrotowa przekroczy określony punkt (od około 200 do 250 obr./min), koło zębate silnika pneumatycznego zostaje odłączone, dopływ powietrza do silnika rozrusznika odcięty, a jednocześnie otwarty dopływ paliwa do silnika wysokoprężnego. Do rozpędzenia dużego silnika wysokoprężnego mogą być wykorzystywane układy rozruchowe złożone nawet z ośmiu pracujących równolegle silników pneumatycznych. W przypadku agregatów wykorzystanych w blokach Vogtle 3 i 4 rozruch wykonują dwa silniki pneumatyczne.

W mniejszych agregatach prądotwórczych instalowanych w elektrowniach jądrowych stosuje się **elektryczne układy rozruchowe** wykorzystujące do obrotu wału korbowego silniki prądu stałego – podobnie jak w samochodowych układach rozruchowych. Sekwencja rozruchu następuje tu podobnie jak w przypadku silnika pneumatycznego. Po otrzymaniu sygnału do rozruchu elektromagnes uruchamia mechanizm załączający, który wciska koło zębate napędu elektrycznego w zazębienie z wieńcem zębatym koła zamachowego silnika spalinowego. Po osiągnięciu odpowiedniej prędkości wału korbowego (a tym samym wystarczającego ciśnienia i temperatury powietrza w cylindrach) podawana jest mieszanka paliwowo-powietrzna, a elektryczny silnik rozruchowy jest odłączany.

4.2. Układ paliwowy

Zapas oleju napędowego przeznaczonego dla zapasowego agregatu prądotwórczego w elektrowni jądrowej zgromadzony jest w zbiorniku/zbiornikach poza budynkiem i wystarcza na co najmniej 7 dni nieprzerwanej pracy



Rys. 7. Schemat blokowy podstawowych systemów zapasowego agregatu prądotwórczego dla energetycznego bloku jądrowego (rys. autora).
Fig. 7. Block diagram of the basic systems of the emergency Diesel generator for a nuclear power unit (source: author's own work).

z pełną mocą. Paliwo pompowane jest podziemnymi przewodami ze zbiornika zewnętrznego do budynku agregatu, gdzie dostarczane jest do zbiornika rozchodowego (ang. *day tank*) poprzez układ filtrów wychytujących potencjalne zanieczyszczenia. W przypadku zapasowych agregatów prądotwórczych bloków Vogtle 3 i 4 zastosowano zbiorniki rozchodowe o pojemności 4920 dm³ (na 1 agregat) z zapasem paliwa wystarczającym na 4-godzinną pracę z pełną mocą. Zapas paliwa w oddzielnym zbiorniku na zewnątrz budynku ma objętość 227 100 dm³ (na 1 agregat), co wystarcza na ponad tygodniową, nieprzerwaną pracę.

Finalnym etapem pracy układu paliwowego jest dostarczenie oleju napędowego do cylindrów silnika za pomocą układu wtrysku wysokociśnieniowego. Jego zadaniem jest dozowanie ilości paliwa niezbędnej do każdego cyklu pracy oraz wytworzenie wysokiego ciśnienia koniecznego do wtrysnięcia paliwa do danego cylindra w odpowiedniej chwili. Układ kontroluje prędkość wtryskiwanego strumienia paliwa, rozpyla mieszkankę paliwowo-powietrzną i rozprowadza ją we wnętrzu cylindra będącego komorą spalania. Powyższe zadania realizowane są przez złożony i bardzo precyzyjny układ raptownie włączający i wyłączający dopływ paliwa w krótkich odstępach czasu. Stopień sprężania w układzie wtrysku wynosi około 15/1. Niektóre z systemów sprężania osiągają ciśnienia przekraczające

30 MPa (!) przy znamionowym obciążeniu i znamionowej prędkości obrotowej agregatu.

Dozowanie paliwa przez układ rozrządu zaworowego musi być precyzyjne: taka sama ilość paliwa musi być dostarczana do każdego cylindra na każdy suw pracy. Jeśli ilość paliwa zmieni się w różnych cylindrach, zmieni się również moc przypadająca na cylinder, co doprowadzi do nierównej pracy silnika i nadmiernych drgań. Paliwo musi być wtryskiwane w odpowiednim momencie. Zbyt wczesny lub późny wtrysk powoduje utratę mocy. Jeśli paliwo zostanie wtrysnięte zbyt wcześnie, gdy sprężanie nie osiągnie maksimum, temperatura sprężonego powietrza będzie zbyt niska, a zapłon opóźniony. Jeśli wtrysk jest opóźniony, tłok może przekroczyć górny martwy punkt, a moc będzie niższa, ponieważ nie nastąpi maksymalne rozprężenie mieszanki paliwowo-powietrznej. Wtrysk musi się rozpocząć natychmiast, trwać przez określony czas, a następnie gwałtownie się zatrzymać, aby uzyskać maksymalną możliwą wydajność.

Szybkość wtryskiwania paliwa różni się w zależności od typu silnika i w dużej mierze zależy od rodzaju i kształtu komór spalania, a także od prędkości obrotowej silnika i charakterystyki zastosowanego paliwa. Wtrysk paliwa musi być odpowiednio ustawiony w czasie. Zbyt szybkie wtrysnięcie paliwa przynosi podobny skutek, jak zbyt wczesny wtrysk. Podobnie, zbyt wolny i rozciągnięty w czasie wtrysk daje efekt podobny do wtrysku opóźnionego.

Paliwo trafia do cylindra silnika w postaci drobinek oleju napędowego rozpylonych w powietrzu. Prawidłowe rozpylenie mieszanki paliwowo-powietrznej zwiększa powierzchnię paliwa wystawionego na działanie tlenu, dając w efekcie skuteczniejsze spalanie i większą moc silnika. Początkowa część strumienia mieszanki musi się składać ze stosunkowo drobnych kropelek do zainicjowania spalania, a następnie większych kropelek potrzebnych podczas głównej części procesu. Stopień rozpylenia paliwa sterowany jest dzięki odpowiedniej średnicy i kształtowi dyszy, ciśnienia wtrysku oraz gęstości sprężonego powietrza w cylindrze, do którego następuje wtrysnięcie mieszanki.

We współczesnych silnikach wysokoprężnych stosowane są cztery rodzaje mechanicznego wtrysku paliwa: układ pompowtryskiwaczy (ang. *unit injector system* lub *cylinder injector system*), układ *common rail*, układ z pompą wporową (ang. *jerk pump*) oraz układ rozdzielacza. W przypadku silników wysokoprężnych stosowanych w zapasowych agregatach prądotwórczych w elektrowniach jądrowych najpowszechniej stosowany jest układ pompowtryskiwaczy. Pompa wporowa i wtryskiwacz tworzą tu pojedynczy zespół dla każdego cylindra. Dzięki temu rozwiązaniu nie ma potrzeby stosowania wysokociśnieniowych przewodów paliwowych prowadzonych wzdłuż silnika spalinowego. Tłoczek pompowtryskiwacza napędzany jest za pomocą systemu dźwigni i popychaczy z wałka rozrządu napędzanego od wału korbowego silnika. Gdy tłoczek przesuwa się w górę – tj. od dyszy wtryskiwacza, odsłania się otwór wlotowy paliwa, co powoduje wpuszczenie oleju napędowego do przestrzeni pod tłoczkiem. Gdy tłoczek pompy przesuwa się w dół, w trakcie suwu tłoczenia, paliwo jest sprężane do ciśnienia wystarczającego do pokonania siły sprężynowego zaworu w dyszy wtryskiwacza. Po otwarciu zaworu paliwo jest wtryskiwane do cylindra. Cały tłoczek może się obracać w korpusie pompy wtryskowej. Im dalej obraca się tłoczek, tym dłuższy jest suw sprężania, zanim dopływ paliwa do cylindra ustanie. Dłuższy efektywny suw sprężania oznacza, że do cylindra wtryskiwana jest większa ilość paliwa. Obrót tłoczka w korpusie pompy wtryskowej jest sterowany przez regulator silnika.

4.3. Układ smarowania

Zadaniem układu smarowania jest zapewnienie ciągłego przepływu oleju smarowego do wszystkich powierzchni trących w elementach ruchomych silnika wysokoprężnego w celu zapewnienia właściwego poślizgu, a dodatkowo do odbioru ciepła z tłoków poruszających się w cylindrach. Cyrkulację oleju zapewniają zwykle dwie pracujące równolegle pompy. Pompa napędzana silnikiem elektrycznym prądu stałego działa przez cały czas – niezależnie od tego, czy silnik spalinowy agregatu pracuje, czy nie. Olej tłoczony przez pompę elektryczną przechodzi przez filtry oraz grzałkę rezystancyjną. Druga, główna pompa olejowa

napędzana od wału silnika jest czynna tylko podczas pracy agregatu. Pompuje ona olej przez zawór sterowany termostaticznie, filtr i wymiennik ciepła układu chłodzenia.

Rezystancyjna grzałka oleju smarowego w obiegu pompy elektrycznej włącza się automatycznie poniżej temperatury oleju 59°C i prędkości obrotowej 125 obr./min. Podczas pracy silnika chłodnica oleju smarowego i termostaticznie sterowany zawór obejściowy regulują temperaturę oleju w zakresie od 63 do 71°C.

Układ zaworów cylindrów i powiązanych z nim dźwigienek zaworowych wyposażony jest w indywidualny system smarowania do ochrony oleju w skrzyni korbowej przed zanieczyszczeniem wodą chłodzącą lub wyciekami paliwa. Układ ten składa się z pompy olejowej napędzanej od wału silnika, która zasysa olej ze zbiornika oleju zaworowego zamontowanego na silniku i pompuje go w celu smarowania układu rozrządu. Olej smarowy spływa następnie z głowic cylindrów z powrotem do zbiornika oleju zaworowego. Układ zawiera również napędzaną silnikiem pompę wstępnego smarowania, która zapewnia dopływ oleju podczas rozruchu i wyłączenia silnika.

4.4. Układ chłodzenia wodnego

Ciepło wytwarzane podczas spalania paliwa w cylindrach oraz ciepło powstające na skutek tarcia elementów mechanicznych jest odprowadzane przez układ chłodzenia wodnego. Zamknięty obieg wody chłodzącej z płaszczem wokół cylindrów wewnątrz bloku silnika usuwa nadmiar ciepła powstającego podczas pracy. Oddzielny, zamknięty obieg wody chłodzącej zapewnia chłodzenie oleju, który odbiera ciepło z powierzchni trących się wzajemnie elementów mechanicznych. Do chłodzenia wykorzystywana jest woda użytkowa (ang. *service water* lub *nuclear service water*) cyrkulująca w instalacji wyposażonej w wymienniki pozwalające na oddanie nadmiaru ciepła do powietrza atmosferycznego.

Większość silników wysokoprężnych agregatów zasilania zapasowego wyposażona jest w turbosprężarkę z chłodnicą międzystopniową z wymiennikiem ciepła. Wymiennik ciepła chłodnicy międzystopniowej, wymiennik ciepła płaszcza wodnego i chłodnica oleju smarowego są chłodzone wodą użytkową. Układ płaszcza wodnego otaczającego cylindry przeznaczony jest do odprowadzania ciepła powstającego w nich podczas spalania. Podczas pracy silnika płaszcz wodny jest zasilany przepływem wody chłodzącej z pompy napędzanej od wału głównego. Temperatura układu chłodzenia wodnego jest utrzymywana przez zawór sterowany termostaticznie, który omija część przepływu zwrotnego wokół wymiennika ciepła. System ten utrzymuje temperaturę wody poza wymiennikiem ciepła w zakresie od 74 do 84°C. Po wyłączeniu silnika wysokoprężnego automatycznie uruchamia się elektryczna pompa wodna, aby utrzymać przepływ przez płaszcz wodny cylindrów. Gdy temperatura płaszcza

wodnego spadnie, zostają uruchomione podgrzewacze wody, aby stale utrzymywać wyłączony silnik spalinowy w temperaturze od 63 do 68°C.

Chłodnia wentylatorowa wody montowana jest zwykle na dachu budynku mieszczącego agregaty prądotwórcze. Woda przepływa przez radiatory, które z kolei mają zapewnione chłodzenie powietrzne wymuszone przez wentylatory elektryczne pracujące w płaszczyźnie poziomej (patrz rysunek 8).

4.5. Układy przedmuchu, odprowadzania spalin, doładowania i turbodoładowania

Spaliny pochodzące z procesu spalania są usuwane z cylindra, czyli **przedmuchiwane**, przez powietrze o ciśnieniu nieznacznie wyższym od atmosferycznego, dostarczane przez odpowiednie dmuchawy.

Doładowanie to dostarczanie powietrza dolotowego o ciśnieniu wyższym od atmosferycznego w celu poprawienia procesu spalania. W niektórych mniejszych agregatach dieslowskich doładowanie zapewnia dmuchawa napędzana wałkiem pomocniczym od wału głównego silnika. Agregaty o większej mocy wykorzystują doładowanie z turbosprężarkami. Gorące spaliny z silnika napędzają turbinę, która z kolei napędza przymocowaną do niej dmuchawę doładowującą.

Spaliny odprowadzane są do atmosfery poprzez układ tłumików – zmniejszających poziom generowanego przez silnik spalinowy hałasu.

4.6. Systemy sterowania

Systemy sterowania regulują strumień paliwa dostarczanego do silnika wysokoprężnego w celu utrzymania zadanej prędkości obrotowej, ustalania tempa przyspieszania przy rozruchu, prędkości obrotowej biegu jałowego i przeciwdziałania zmianom obciążenia.

Hydrauliczne regulatory obrotów zastąpiły regulatory mechaniczne w ewolucji układów sterowania silnikami. Zapewniają one odpowiednią czułość, prędkość działania i sterowanie izochroniczne. Układ steruje przepływem oleju hydraulicznego do i z serwomechanizmu sterującego dopływem paliwa. Kontrola stabilności i spadku prędkości może być wbudowana w hydrauliczny regulator obrotów poprzez mechanizm sprzężenia zwrotnego. Stosuje się przy tym układ kompensujący, aby zapobiec ciągłym wahaniom i nadmiernej korekcie ustawień dopływu paliwa. Hydrauliczne regulatory obrotów są bardziej czułe niż stosowane dawniej regulatory mechaniczne i lepiej nadają się do większych silników wymagających dokładniejszej regulacji paliwa.

Regulacja prędkości obrotowej silnika wysokoprężnego z zachowaniem ścisłych tolerancji wymaganych do utrzymania precyzyjnej częstotliwości generatora synchronicznego jest zazwyczaj możliwa jedynie w układzie z **regulatorem elektronicznym**. Nowoczesne sterowniki współczesnych agregatów prądotwórczych są złożonymi układami elektronicznymi zbudowanymi na bazie techniki mikroprocesorowej. Obwody elektroniczne regulatora umożliwiają precyzyjną pracę w trzech trybach: regulacji obciążenia, regulacji prędkości obrotowej i regulacji



Rys. 8. Chłodnia wentylatorowa na budynku agregatów prądotwórczych obsługujących dwa starsze bloki 1 i 2 Elektrowni Jądrowej Olkiluoto w Finlandii (Fot. TVO).

Fig. 8. Fan cooling system on the Diesel generator building serving two older units 1 and 2 of the Olkiluoto Nuclear Power Plant in Finland (source: TVO).



Rys. 9. Dostawa używanego silnika wysokoprężnego do Elektrowni Jądrowej Loviisa w Finlandii. Agregat prądowłórczy został zakupiony z likwidowanej EJ Krümmel w Niemczech (fot. Vattenfall).

Fig. 9. Delivery of a used diesel engine to the Loviisa Nuclear Power Plant in Finland. The genset was purchased from the decommissioned Krümmel NPP in Germany (source: Vattenfall).

rozruchu (przyspieszania). Bardziej szczegółowe omówienie regulacji pracy agregatu w zależności od konfiguracji, w jakiej pracuje (praca samodzielna, praca równoległa) podane zostanie w drugiej części artykułu.

4.7. Generator i układy elektryczne

W zapasowych agregatach prądowłórczych zazwyczaj wykorzystywane są synchroniczne generatory prądu przemiennego (zwane również alternatorami). Zadaniem generatora jest przekształcenie energii mechanicznej silnika Diesla w energię elektryczną przekazywaną za pośrednictwem trójfazowego prądu przemiennego. Generator synchroniczny składa się z części obrotowej (wirnika) i części nieruchomej (stojana). Ten typ generatora jest preferowany ze względu na wysoką stabilność pracy i niezawodność. Trójfazowy prąd przemienny generowany jest w uzwojeniach stojana.

Obwód wzbudzenia generatora ma za zadanie wytworzenie pola magnetycznego powstającego w wyniku przepływu prądu stałego przez uzwojenia wirnika. W starszych rozwiązaniach prąd stały uzyskiwany był z prostownika zasilanego z oddzielnej prądnicy wzbudzenia. Obecnie zasilanie stałoprądowe wzbudzenia uzyskiwane jest z urządzeń energoelektronicznych zbudowanych na bazie elementów półprzewodnikowych.

Linia zasilająca z zapasowego generatora agregatu prądowłórczego połączona jest linią kablową z jedną z rozdzielni znajdującą się w budynkach energetycznego bloku jądrowego. Pole generatorowe rozdzielni wyposażone jest w wyłącznik.

5. Specyfika, wymagania projektowe i eksploatacyjne dla zapasowych agregatów prądowłórczych w energetyce jądrowej – przepisy prawne i wytyczne

Specyfika eksploatacji zapasowych agregatów prądowłórczych w elektrowni jądrowej polega na tym, że przez ogromną większość czasu normalnej pracy elektrowni agregaty pozostają wyłączone. Jednocześnie muszą one zachowywać pełną gotowość do natychmiastowego uruchomienia na wypadek sytuacji awaryjnej, kiedy muszą przejąć rolę źródeł zasilania istotnych układów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego, w sytuacji gdy niedostępne są preferowane źródła zasilania: przede wszystkim z własnego generatora turbozespołu, a także z sieci energetyki zawodowej poprzez układy rozdzielni przezelektrownianej. Jest to zatem rodzaj pracy o odmiennej specyfice niż w innych aplikacjach dużych silników wysokoprężnych – np. napędach okrętowych, odznaczających się długotrwałymi okresami pracy ciągłej.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania niezwykle istotne jest, aby agregaty prądowłórcze w elektrowni jądrowej poddawane były okresowym sprawdzeniom i próbom w celu zachowania najwyższego poziomu gotowości do pracy w przypadku powstania sytuacji awaryjnej. Zagadnienia te powinny stanowić przedmiot szczególnej troski zarówno operatora elektrowni jądrowej, jak i właściwego dla danego kraju urzędu dozoru jądrowego.

Bazę do sformułowania wymagań dla zapasowych agregatów prądowłórczych na szczeblu międzynarodowym tworzą standardy i dokumenty doradcze wydawane przez

Międzynarodową Agencję Energii Atomowej z siedzibą w Wiedniu. W tym kontekście należy wymienić tu następujące publikacje:

- Szczegółowe Wymagania Bezpieczeństwa nr **SSR-2/1** (ang. *Specific Safety Requirements No. SSR-2/1*), „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych: Projektowanie” (ang. *Safety of Nuclear Power Plants: Design*) [1].
- Szczegółowe Wymagania Bezpieczeństwa nr **SSR-2/2** (ang. *Specific Safety Requirements No. SSR-2/2*) „Bezpieczeństwo elektrowni jądrowych: Uruchomienie i eksploatacja” (ang. *Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation*) [2].
- Szczegółowe wytyczne dotyczące bezpieczeństwa nr **SSG-30** (ang. *Specific Safety Guide No. SSG-30*) „Klasyfikacja bezpieczeństwa, struktur, systemów i komponentów w elektrowniach jądrowych” (ang. *Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*) [3].
- Szczegółowe wytyczne dotyczące bezpieczeństwa nr **SSG-34** (ang. *Specific Safety Guide No. SSG-34*) „Projektowanie układów zasilania elektrycznego potrzeb własnych elektrowni jądrowych” (ang. *Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants*) [4].

Powyższe wymagania i wytyczne mają charakter bardzo ogólny i uniwersalny. Format i styl, w jaki są one sformułowane, mają w założeniu ułatwić ich stosowanie przez państwa członkowskie MAEA do ustanawiania, w zharmonizowany sposób, własnych regulacji i przepisów.

5.1. Polskie przepisy prawne

Podstawowe wymagania dla zapasowych źródeł zasilania elektrycznego w obiektach jądrowych określone są w przepisach polskich w tzw. **Rozporządzeniu projektowym** do Prawa atomowego (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 roku w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego [14]). W dokumencie tym wymagania dla miejscowych systemów zasilania elektrycznego sprecyzowane są w **Dziale IV, Rozdziale 5 pt. „Systemy zasilania elektrycznego obiektu jądrowego”**. Określają one zasady projektowania i budowy systemów zasilania elektrycznego dla „niezawodnego funkcjonowania systemów oraz elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu jądrowego mających istotne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej”. Przepisy polskie są zgodne z zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (patrz powyżej), a także z analogicznymi przepisami amerykańskimi i przepisami krajów europejskich. Ze względu na łatwość dostępu do rzeczonoego rozporządzenia jego szczegółowe zapisy nie będą tu cytowane. Najważniejsze części tekstu dotyczące agregatów prądotwórczych zasilania zapasowego w Rozporządzeniu projektowym to (w streszczeniu):

§ **93.1.** – zapewnienie zasilania elektrycznego obiektu jądrowego ze źródeł wewnętrznych i zewnętrznych;

§ **93.2.** – zapewnienie wystarczającej mocy i energii ze źródeł wewnętrznych;

§ **94.** – wymóg niezależności, redundancji i możliwości testowania źródeł wewnętrznych;

§ **97.** – zapewnienie możliwości okresowych kontroli i prób;

§ **99.1.** – zapewnienie niezawodnego działania po wystąpieniu przewidzianych zdarzeń eksploatacyjnych;

§ **99.2.** – zapewnienie zasilania przez czas min. 7 dób ze źródeł wewnętrznych;

§ **99.4.** – wymóg uwzględnienia w projekcie alternatywnych źródeł zasilania prądem przemiennym – tj. np. przenośnych lub przewoźnych agregatów prądotwórczych;

§ **100.1.1.** – wymóg niezawodności i spójności z wymaganiami ze strony zasilanych systemów bezpieczeństwa;

§ **100.1.2.** – wymóg realizacji funkcji przy założeniu wystąpienia pojedynczego uszkodzenia;

§ **100.2.2.** – wymóg możliwości testowania sprawności funkcjonalnej;

§ **101.** – wymóg określenia w założeniach projektowych: 1. pojemności zbiorników oleju napędowego i wydajności systemów zasilania w paliwo; 2. zdolności do uruchomienia i działania; 3. rodzajów systemów pomocniczych.

5.2. Amerykańskie przepisy prawne

Stany Zjednoczone rozwijające technikę jądrową, a w szczególności energetykę jądrową, od ponad siedmiu dekad posiadają imponujący dorobek w zakresie przepisów prawnych i wytycznych dozoru jądrowego dotyczących zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi.

Na szczególną uwagę zasługują tu regulacje zawarte w **ogólnym kryterium projektowym** (ang. *General Design Criterion – GDC*) **nr 17 pt. „Systemy zasilania elektrycznego”** podane w Załączniku A, „Ogólne kryteria projektowe dla elektrowni jądrowych” do przepisów federalnych 10 CFR Część 50 „Krajowe licencjonowanie obiektów produkcyjnych i użytkowych”. Geneza tego dokumentu wywodzi się z Ogólnych Kryteriów Projektowych z dnia 10 lipca 1967 roku, opracowanych przez Komisję Energii Atomowej (ang. *Atomic Energy Commission – AEC*), na których podstawie licencjonowane było wiele wczesnych amerykańskich elektrowni jądrowych należących do generacji II, których budowa rozpoczęła się jeszcze przed 1972 rokiem.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami 10 CFR Część 50, według których licencjonowano większość amerykańskich energetycznych bloków jądrowych od 1972 roku wymaga się, aby: „miejscowe systemy zasilania elektrycz-

nego miały wystarczającą niezależność, moc, sprawność, redundancję i testowalność dla zapewnienia, że:

1. określone dopuszczalne ograniczenia projektowe dla paliwa jądrowego i warunki projektowe granicy ciśnienia chłodziwa reaktora nie zostaną przekroczone w wyniku przewidywanych zdarzeń eksploatacyjnych oraz

2. rdzeń (reaktora) jest chłodzony, a integralność obudowy i inne istotne funkcje są zachowane w przypadku przewidywanych awarii, przy założeniu wystąpienia pojedynczego uszkodzenia.”

Istotne znaczenie ma tu również **ogólne kryterium projektowe nr 18, „Inspekcja i testowanie systemów elektroenergetycznych”** (wchodzące również w skład wspomnianego powyżej Załącznika A) wymagające, aby: „systemy zasilania elektrycznego ważne dla bezpieczeństwa były zaprojektowane w taki sposób, aby umożliwiać odpowiednią okresową inspekcję i testowanie ważnych obszarów i cech, takich jak okablowanie, izolacja, połączenia i rozdzielnice, w celu oceny ciągłości systemów i stanu ich podzespołów. Systemy muszą być zaprojektowane z możliwością do okresowego testowania (1) sprawności i wydajności funkcjonalnej komponentów systemów, takich jak lokalne źródła zasilania, przekładniki, przełączniki i szyny zbiorcze, oraz (2) sprawności systemów jako całości i, w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do projektowych, pełnej sekwencji operacyjnej, która uruchamia systemy, w tym działanie odpowiednich części systemu zabezpieczeń i przesyłanie mocy między blokiem jądrowym, zewnętrznym systemem zasilania i miejscowym systemem zasilania.”

Kryteria nr 33, 34, 35, 38, 41 i 44: ustalają zasady odnoszące się do poszczególnych systemów bezpieczeństwa (tj. systemów uzupełniania chłodziwa, odprowadzania ciepła powyłączeniowego, awaryjnego chłodzenia rdzenia reaktora), aby mogły one wykonywać wymagane funkcje, nawet zakładając utratę zasilania zewnętrznego (LOOP – ang. *Loss Of Offsite Power*) i pojedynczą awarię źródła zasilania miejscowego.

Poza powyższych przepisów szczegółowych zastosowanie znajdują tu nadrzędne regulacje prawa federalnego USA odnoszące się do licencjonowania, budowy, uruchomienia oraz eksploatacji elektrowni jądrowych. Są to:

10 CFR 50.10 – „Wymagane licencje; zezwolenie na wstępne roboty budowlane” (ang. *License required; limited work authorization*).

10 CFR 50.23 – „Zezwolenia na budowę” (ang. *Construction permits*);

10 CFR 50.34 – „Zawartość wniosku; informacje techniczne” (ang. *Contents of applications; technical information*). Przepis ten określa m.in. zawartość raportów bezpieczeństwa: wstępnego oraz końcowego, ważną z punktu widzenia właściwego doboru zapasowych agregatów prądowców;

10 CFR 50.36 – „Specyfikacje techniczne” (ang. *Technical specifications*);

10 CFR 50.54 – „Warunki licencji” (ang. *Conditions of licenses*);

10 CFR 50.55a – „Dokumenty normalizacyjne” (ang. *Codes and standards*);

10 CFR 50.56 – „Przekształcenie pozwolenia na budowę na licencję; lub zmiana licencji” (ang. *Conversion of construction permit to license; or amendment of license*);

10 CFR 50.57 – „Wydanie licencji eksploatacyjnej” (ang. *Issuance of operating license*);

10 CFR 50.63 – „Całkowita utrata zasilania prądem przemiennym” (ang. *Loss of all alternating current power – Station Blackout*). Przepisy te są dodatkowym źródłem funkcjonalnych wymogów regulacyjnych dotyczących zapasowych agregatów prądowców. Docelowa niezawodność agregatów jest wykorzystywana do określania zdolności energetycznego bloku jądrowego do radzenia sobie z przerwami w dostawie prądu z sieci energetyki zawodowej.

5.3. Wytyczne – przewodniki regulacyjne amerykańskiego dozoru jądrowego U.S. NRC

Przewodniki regulacyjne U.S. Nuclear Regulatory Commission są dokumentami zawierającymi wytyczne uznawane za akceptowalne przez dozór jądrowy w zakresie wdrażania przepisów, oceny konkretnych kwestii i rozpatrywania wniosków. Same w sobie nie są one przepisami (jak regulacje 10 CFR opisane powyżej), a ich przestrzeganie nie jest obowiązkowe, jednakże oferują one ścieżkę do spełnienia wymogów regulacyjnych. Częścią wytycznych podanych w RG są uznane przez nie normy krajowe i międzynarodowe (ANSI – Amerykańskiego Krajowego Instytutu ds. Standaryzacji – ang. *American National Standards Institute*; IEEE – Instytutu Inżynierów Elektryków i Elektroników – ang. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*; NFPA – Krajowego Stowarzyszenia Ochrony Przeciwpowodziowej – ang. *National Fire Protection Association*). Przykładowe zestawienie obowiązujących wytycznych U.S. NRC z uwzględnieniem włączeń (ang. *endorsements*) norm IEEE dla energetycznego bloku jądrowego AP1000 podane jest w publikacji [12].

Poniżej przedstawione zostaną publikacje z wytycznymi U.S. NRC odnoszące się do zapasowych agregatów prądowców dla energetycznych bloków jądrowych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.6 – Regulatory Guide 1.6**, „Niezależność między redundantnymi źródłami zasilania rezerwowego (miejscowego) a ich systemami dystrybucji (Przewodnik bezpieczeństwa 6)”, (ang. *Regulatory Guide 1.6, Independence Between Redundant Standby (Onsite) Power Sources and Between Their Distribution Systems (Safety Guide 6)*), wydany 10 sierpnia 1971 roku [16]. Zgodnie z tym dokumentem każde źródło zasilania (np. agregat prądowcowy) musi mieć „...zdolność do działania jako redundantna jednostka będąca zapasowym źródłem zasilania”. Dlatego też, pod względem mechanicznym i elektrycznym, agregat

prądotwórczy zasilania zapasowego musi być w stanie działać podczas i po każdym zdarzeniu projektowym bez wsparcia preferowanego źródła zasilania (tj. np. sieci energetyki zawodowej). Pomimo to, że ostatnia rewizja RG 1.6 miała miejsce w 1971 roku, U.S. NRC twierdzi, że same wytyczne są nadal aktualne, technicznie poprawne, a ich język jest jasny i zrozumiały.

• Przewodnik regulacyjny 1.9 – Regulatory Guide 1.9

„Wybór, projektowanie, kwalifikacja i testowanie zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi używanych jako systemy miejscowego zasilania elektrycznego klasy 1E w elektrowniach jądrowych” (ang. *Selection, Design, Qualification and Testing of Emergency Diesel Generator Units Used as Class 1E Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants*; dawniej Przewodnik bezpieczeństwa AEC 9); najnowsze wydanie: *Revision 4* z marca 2007 roku [17].

Regulatory Guide 1.9 ustanawia trzy następujące wymagania dotyczące osiągow zapasowego agregatu prądotwórczego, które musi spełnić, aby wykonywać funkcję projektową w systemach elektrowni jądrowej:

1. Agregat musi być w stanie „...wykonać rozruch i przejąć szereg dużych obciążeń silnikowych w szybkiej sekwencji włączeń, utrzymując przy tym napięcie i częstotliwość w dopuszczalnych granicach...”.
2. Agregat musi być również w stanie „...zapewnić natychmiastowe zasilanie do realizacji funkcji bezpieczeństwa, jeśli równocześnie nastąpi awaria i utrata zasilania zewnętrznego.”
3. Agregat musi „...nieprzerwanie dostarczać zasilanie do urządzeń potrzebnych do utrzymania elektrowni w stanie bezpiecznym...”.

Regulatory Guide 1.9 powołuje się na wspomniane wcześniej przepisy ogólnego kryterium projektowego **GDC 17** – „Systemy zasilania elektrycznego” i **GDC 18** – „Inspekcja i testowanie systemów zasilania elektrycznego”. Dokument odwołuje się również do zapisów norm:

- **IEEE 308** (kolejne wydania: 1970, 1971, 1974, 1978, 1980, 1991, 2001, 2012, 2020) – „Standardowe kryteria dla systemów zasilania klasy 1E dla elektrowni jądrowych” (ang. *IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations*) [5].
- **IEEE 387** (kolejne wydania: 1972, 1977, 1984, 1995, 2017, 2024) – „Standardowe kryteria IEEE dla agregatów prądotwórczych stosowanych jako zapasowe źródła zasilania dla elektrowni jądrowych” (ang. *IEEE Standard for Criteria for Diesel Generator Units Applied as Standby Power Supplies for Nuclear Power Generating Stations*) [7], [9]. Normą nadrzędną dla IEEE 387 jest wspomniana wcześniej norma IEEE 308 [5]. Norma IEEE 387 rozszerza zakres normy IEEE 308 o rozdział 6.2.4, „Układy zasilania zapasowego” w odniesieniu do zastosowania agregatów prądotwórczych z silnikiem Diesla. W najnowszej

edycji z 2024 roku dokument ten został uwspólniony dla porządków normalizacyjnych IEEE (typowego dla USA i krajów podążających za normalizacją amerykańską) i IEC (ang. *International Electrotechnical Commission* – typowego dla krajów europejskich i dużej części pozostałych obszarów świata). Norma otrzymała „podwójne” oznaczenie: **IEC/IEEE 6332-387:2024** [9]. Norma dotyczy zarówno nowych, jak i modernizowanych elektrowni jądrowych. Określa ona główne kryteria projektowe, cechy konstrukcyjne, wymagania dotyczące testowania i kwalifikacji agregatów prądotwórczych, tak aby spełniały one swoje funkcje w warunkach awaryjnych. Ma ona kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych poprzez standaryzację wymagań dla systemów zasilania zapasowego. Norma ta w powiązaniu z Regulatory Guide 1.9 zawiera precyzyjny i kompleksowy zestaw wymagań dotyczących projektowania, testowania i kwalifikacji zapasowych agregatów z silnikami Diesla stosowanych w energetyce jądrowej. Nie wszystkie spośród elektrowni jądrowych w USA zobowiązane są do stosowania normy IEEE 387. W szczególności dotyczy to najstarszych obiektów, które otrzymały licencję przed 1972 roku. Norma ta popiera również kilka innych zbiorów zaleceń i norm, w tym przewodnik Stowarzyszenia Producentów Silników Diesla (DEMA – ang. *Diesel Engine Manufacturer's Association*) pt. „Standardowe praktyki dla silników Diesla i silników gazowych o niskiej i średniej prędkości”, ostatnio edytowany w 1972 roku DEMA nie jest już obecnie aktywnym stowarzyszeniem, ale zdaniem U.S. NRC wytyczne te są nadal istotne dla kryteriów projektowych stosowanych w odniesieniu do zapasowych agregatów prądotwórczych instalowanych w większości amerykańskich elektrowni jądrowych. Wersje normy IEEE 387 wydane po 1977 roku określają również kryteria wstępnych testów kwalifikacyjnych „pierwszej jednostki” danego typu agregatu prądotwórczego przeznaczonego do wykorzystania w zapasowych systemach zasilania dla elektrowni jądrowych. Norma IEEE 387 w edycji z 1995 roku podała podstawę projektową dla zapasowych agregatów prądotwórczych dla elektrowni jądrowych, tj. 4000 rozruchów i 6000 godzin pracy, w określonym okresie eksploatacji wynoszącym 40 lat. Jak już wspomniano wcześniej, taka właśnie specyfika eksploatacji agregatu prądotwórczego z silnikiem Diesla, z ogromną liczbą uruchomień i zatrzymań oraz długich przestojów, bardzo różni się od typowej eksploatacji silników wysokoprężnych podobnej mocy w innych obszarach zastosowań komercyjnych.

- **IEC/IEEE 60780-323** (wydanie 2016) „Norma międzynarodowa – Obiekty jądrowe – Wyposażenie elektryczne ważne dla bezpieczeństwa – Kwalifikacja”

(ang. *International Standard – Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety – Qualification*) [8]. Norma ta zastąpiła wcześniejszy standard IEEE 323 (ang. *Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations*). Pierwotny standard opublikowano w 1971 roku, a jego kolejne wersje edytowano w latach 1974, 1983 i 2003. Norma określa podstawowe wymagania dotyczące kwalifikacji urządzeń elektrycznych o kluczowym znaczeniu dla bezpieczeństwa oraz ich interfejsów (elektrycznych i mechanicznych) w obiektach jądrowych. Koncentruje się ona na wykazaniu i udokumentowaniu zdolności urządzenia do wykonywania funkcji bezpieczeństwa w różnych warunkach eksploatacji, w tym podczas okresów normalnego użytkowania oraz zdarzeń projektowych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.32 – Regulatory Guide 1.32** „Kryteria dotyczące systemów zasilania elektrycznego związanych z bezpieczeństwem elektrowni jądrowych” (ang. *Criteria for Safety-Related Electric Power Systems for Nuclear Power Plants*); najnowsze wydanie: *Revision 3*, marzec 2004 roku [18]. Wytyczne 1.32 mają na celu wdrożenie zgodności wymagań U.S. NRC z następującymi dokumentami:

- Ogólne kryterium projektowe **GDC 17** (patrz powyżej).
- Norma **IEEE 308** (patrz powyżej). Wytyczne RG 1.32 powołują się na wymagania IEEE 308 w kontekście możliwości zasilania zapasowego (np. z agregatu prądotwórczego) wykorzystywanego jako niezależna/redundantna jednostka (lub zespół jednostek).

- **Przewodnik regulacyjny 1.75 – Regulatory Guide 1.75** „Kryteria dla niezależności elektrycznych systemów bezpieczeństwa” (ang. *Criteria for Independence of Electrical Safety Systems*), najnowsze wydanie: *Revision 3*, luty 2005 roku [19]. Przewodnik 1.75 zawiera wskazówki dla posiadaczy licencji na elektrownie jądrowe i potencjalnych wnioskodawców odnoszące się do sposobu spełnienia wymagań dotyczących fizycznego rozdzielania i separacji elektrycznej obwodów i urządzeń wchodzących w skład systemów bezpieczeństwa. Zasadniczo przedstawia on dopuszczalne metody utrzymania niezależności tych systemów, zapewniając ich prawidłowe funkcjonowanie w trakcie i po wystąpieniu zdarzeń projektowych. RG 1.75 powołuje się również na normę:

- **IEEE 384:2018** – „Standardowe kryteria niezależności urządzeń i obwodów klasy 1E” (ang. *IEEE Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits*) [6]. W normie opisano wymagania dotyczące niezależności obwodów i urządzeń wchodzących w skład systemów klasy 1E lub z nimi powiązanych. Przedstawiono kryteria niezależności, jaką można osiągnąć poprzez fizyczną separację i izolację elektryczną obwodów i urządzeń redundantnych.

- **Przewodnik regulacyjny 1.93 – Regulatory Guide 1.93** „Dostępność źródeł energii elektrycznej” (ang.

Availability of Electric Power Sources); najnowsze wydanie: *Revision 1*, marzec 2012 roku [20]. Przewodnik RG 1.93 zawiera wytyczne dla posiadaczy licencji na elektrownie jądrowe dotyczące dopuszczalnych działań w przypadku, gdy liczba dostępnych źródeł energii elektrycznej spadnie poniżej minimum wymaganego przez specyfikacje techniczne. W szczególności dotyczy on sytuacji, w których graniczne warunki eksploatacji (ang. *Limiting Conditions for Operation* – LCO) elektrowni nie są spełnione z powodu zmniejszenia liczby dostępnych źródeł energii wymaganych przez ogólne kryterium projektowe GDC 17.

- **Przewodnik regulacyjny 1.108 – Regulatory Guide 1.108** „Okresowe testy agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla wykorzystywanych jako miejscowe systemy zasilania w elektrowniach jądrowych” (ang. *Periodic Testing of Diesel Generator Units Used as Onsite Electric Power Systems at Nuclear Power Plants*). Dokument ten został wycofany przez U.S. NRC w 1993 roku i zastąpiony przez Regulatory Guide 1.9, *Revision 3* (patrz powyżej). W niektórych starszych amerykańskich elektrowniach jądrowych, w przypadku których licencjodawcy zobowiązali się do przestrzegania RG 1.108, przyjęto następnie RG 1.9 tylko częściowo.

- **Przewodnik regulacyjny 1.137 – Regulatory Guide 1.137** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych” (ang. *Fuel-Oil Systems for Standby Diesel Generators*); najnowsze wydanie: *Revision 2* z czerwca 2013 roku [21]. RG 1.137 przedstawia metody uznane za dopuszczone przez U.S. NRC w celu zapewnienia jakości i niezawodności dostawy oleju napędowego do zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla. Obejmuje on wytyczne dotyczące przechowywania, postępowania z olejem napędowym i jego testowania w celu zapobiegania degradacji oraz zapewnienia sprawności systemów oleju napędowego w sytuacjach awaryjnych. RG 1.137 ma również na celu wdrożenie zgodności z częściami przepisów ogólnego kryterium projektowego GDC 17, a także popiera normy:

- **ANSI N195** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych z silnikami Diesla” (ang. *Fuel Oil Systems for Standby Diesel Generators*) – norma z 1976 roku; ostatnio publikowana w 2013 roku i wycofana w 2022 roku.

- **ANSI/ANS-59.51-1997 (R2015)** „Systemy oleju napędowego dla zapasowych agregatów prądotwórczych związanych z bezpieczeństwem” (ang. *Fuel Oil Systems for Safety-Related Emergency Diesel Generators*) – norma pierwotnie wydana w 1997 roku i potwierdzona w latach: 2007 i 2015. Określa ona wymagania funkcjonalne, wydajnościowe i projektowe dla układu oleju napędowego dla agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi, zapewniającymi miejscowe zasilanie zapasowe istotne dla bezpie-

czeństwa w energetycznych blokach jądrowych z reaktorami lekkowodnymi. Dotyczy ona wyposażenia mechanicznego związanego z układem oleju napędowego, z wyjątkiem elementów montowanych na samej konstrukcji silnika Diesla, a także wymagania funkcjonalne dotyczące oprzyrządowania i sterowania.

- **Przewodnik regulacyjny 1.155 – Regulatory Guide 1.155** „Utrata zasilania bloku energetycznego” (ang. *Station Blackout – SBO*); wydany w 1988 roku RG 1.155 zawiera wytyczne dla operatorów elektrowni jądrowych dotyczące radzenia sobie z awarią zasilania prądem przemiennym (zarówno miejscowego, jak i zewnętrznego) energetycznego bloku jądrowego.

W przewodniku opisano konieczność wytrzymania awarii zasilania bloku przez określony czas, na bazie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii SBO oraz zdolność bloku do przywrócenia zasilania. Przewodnik odwołuje się do innych dokumentów, takich jak norma IEEE 387 (patrz powyżej), a także uwzględnia kwestie niezależności źródeł zasilania i możliwości doprowadzenia elektrowni do bezpiecznego stanu wyłączenia podczas awarii SBO. Uwzględnia również wpływ awarii zasilania na inne systemy elektrowni oraz potrzebę zapewnienia odpowiedniej wydajności i niezawodności alternatywnych źródeł zasilania prądem przemiennym.

RG 1.155 ma na celu zapewnienie zgodności z wymaganiami przepisów 10 CFR 50.63, „Utrata całego zasilania prądem przemiennym...”. „Określony czas trwania przerwy w dostawie energii elektrycznej powinien być oparty na następujących czynnikach: (i) Nadmiarowość lokalnych zapasowych źródeł zasilania prądem przemiennym; (ii) Niezawodność lokalnych zapasowych źródeł zasilania prądem przemiennym...”

RG 1.155 powołuje się również na dokument NUMARC 8700: Wytyczne i podstawy techniczne dla inicjatyw NUMARC dotyczących przerw w dostawie energii elektrycznej w energetycznych blokach jądrowych z reaktorami lekkowodnymi (ang. *Guidelines and Technical Bases for NUMARC Initiatives Addressing Station Blackout at Light Water Reactors*).

5.4. Wytyczne fińskiego dozoru jądrowego STUK

Fiński urząd dozoru jądrowego STUK (fiń. *Säteilyturvakeskus*; ang. *Radiation and Nuclear Safety Authority*) opracował przewodnik **YVL E.10**, zatytułowany „Układy zasilania zapasowego w obiekcie jądrowym” (fiń. *Ydinlaitoksen varavoiimalähteet*; ang. *Emergency power supplies of a nuclear facility*), najnowsza edycja: 2020 rok [15]. określający wymagania dotyczące projektowania, produkcji, instalacji, uruchomienia, eksploatacji, monitorowania stanu i konserwacji systemów zasilania zapasowego w obiektach jądrowych. Opisuje on również nadzór regulacyjny stosowany przez STUK oraz upoważnione organy inspekcyjne w celu zapewnienia zgodności z obowiązującymi regulacjami.

Przewodnik dotyczy układów zasilania zapasowego dla klas bezpieczeństwa 2 i 3.

W szczególności wytyczne YVL E.10 obejmują zespoły prądotwórcze zarówno z silnikami dieslowskimi, jak i z turbinami gazowymi. Oprócz tego omówione są powiązane z nimi podzespoły i urządzenia niezbędne do wytwarzania energii w obiekcie jądrowym w stanach przejściowych i awaryjnych. W przewodniku szczegółowo opisano środki regulacyjne stosowane przez STUK i upoważnione organy inspekcyjne w celu weryfikacji spełnienia wymagań w całym cyklu użytkowania zapasowych systemów zasilania: począwszy od wyprodukowania, montażu i uruchomienia, eksploatacji, konserwacji i remontów, aż do wycofania. W przewodniku podkreślono, że wymagania są wiążące dla licencjohioborców i producentów podzespołów stosowanych w układach zasilania zapasowego. Podkreślono również odpowiedzialność licencjohioborcy za zapewnienie niezawodności układów zasilania zapasowego i możliwości realizacji przez nie funkcji bezpieczeństwa przez cały okres eksploatacji obiektu.

W dokumencie YVL E.10 w odniesieniu do projektowania agregatów prądotwórczych z silnikami wysokoprężnymi dokumentem odniesienia jest niemiecka norma jądrowa (niem. *Kerntechnischer Ausschuss*) **KTA 3702** „Zapasowe urządzenia do wytwarzania energii z agregatami prądotwórczymi z silnikami Diesla w elektrowniach jądrowych” (niem. *Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken*; ang. *Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants*) [10].

★ ★ ★

W drugiej części artykułu, który zostanie opublikowany w następnym numerze Biuletynu „BJOR”, omówione zostaną m.in. zagadnienia rozruchu agregatu w warunkach awaryjnych, obciążania sekwencyjnego agregatu odbiornikami energii elektrycznej systemów potrzeb własnych energetycznego bloku jądrowego, wpływu zmian napięcia i częstotliwości na pracę systemu zasilania zapasowego, wymagania projektowe, kwalifikacja urządzeń i ich testowanie.

O autorze

Dr inż. Jacek Nowicki – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z 1988 roku. W tej uczelni w 1996 roku obronił doktorat w pod kierunkiem prof. Zbigniewa Cioka. Zawodowo związany był z polskimi i międzynarodowymi firmami przemysłu elektrotechnicznego i budownictwa elektroenergetycznego: ZWAR, ABB, Schneider Electric, VA Tech, Elektrobudowa i Erbud International, pracując na rynku krajowym oraz rynkach zagranicznych, m.in. w Królestwie Arabii Saudyjskiej. W latach 2017–2023 pełnił funkcję Sekretarza Generalnego Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Obecnie jest ekspertem ds. zagadnień elektrycznych w Departamencie Bezpieczeństwa Jądrowego Państwowej Agencji Atomistyki. Jest autorem wielu publikacji z dziedziny energetyki jądrowej, energetyki odnawialnej i magazynowania energii. Wspólnie z prof. Janem Maksymiukiem napisał podręcznik akademicki „Aparaty elektryczne i rozdzielnice wysokich i średnich napięć” (2014 rok).

Literatura

1. IAEA Safety Standards, *Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements*, No. SSR-2/1 (Rev. 1).
2. IAEA Safety Standards, *Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation*, Specific Safety Requirements No. SSR-2/2 (Rev. 1).
3. IAEA Safety Standards, *Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*, Specific Safety Guide No. SSG-30.
4. IAEA Safety Standards, *Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants*, Specific Safety Guide No. SSG-34.
5. IEEE 308:2020. *IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations*.
6. IEEE 384:2018. *IEEE Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits*.
7. IEEE 387:2024. *IEEE Standard for Criteria for Diesel Generator Units Applied as Standby Power Supplies for Nuclear Power Generating Stations*.
8. IEEE/IEC 60780-323:2016. *International Standard – Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety – Qualification*.
9. IEC/IEEE 63332-387:2024. *International Standard for Nuclear facilities – Electrical power systems – Diesel generator units applied as standby power sources*.
10. KTA 3702:2022-11, *Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten in Kernkraftwerken (Emergency Power Generating Facilities with Diesel-Generator Units in Nuclear Power Plants)*.
11. Mazzoni O.S., *Electrical Systems for Nuclear Power Plants*, IEEE Press / John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2019.
12. Nowicki J., *Część elektryczna i AKPiA elektrowni jądrowej: budowa, działanie, wymagania normalizacyjne i jakościowe, wytyczne i zalecenia dla dostawców i wykonawców*, Ministerstwo Przemysłu, Katowice 2024 r.
13. Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, wyd. VII, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014 r.
14. *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 31 sierpnia 2012 r. w sprawie wymagań bezpieczeństwa jądrowego i ochrony radiologicznej, jakie ma uwzględniać projekt obiektu jądrowego*, Dziennik Ustaw, 20 września 2012 r. poz. 1048.
15. STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority), Guide YVL E.10 *Emergency power supplies of a nuclear facility*, Vantaa, Finland, January 20, 2020.
16. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.6, *Independence Between Redundant Standby (Onsite) Power Sources and Between Their Distribution Systems* (Safety Guide 6), Aug. 10, 1971.
17. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.9 *Application and Testing of Safety-Related Diesel Generators in Nuclear Power Plants*, Revision 4, March 2007.
18. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.32 *Criteria for Safety-Related Electric Power Systems for Nuclear Power Plants*; Revision 3, March 2004.
19. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.75, *Criteria for Independence of Electrical Safety Systems*, Revision 3, February 2005.
20. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.93, *Availability of Electric Power Sources*, Revision 1, March 2012.
21. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide (RG) 1.137, *Fuel-Oil Systems for Standby Diesel Generators*, Revision 2, June 2013.