



Europejski
Instytut Miedzi
Copper Alliance



ZASILANIE BUDYNKÓW W ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ W WARUNKACH NORMALNYCH A ZASILANIE W WARUNKACH POŻARU

mgr inż. Julian Wiatr

Przy projektowaniu układów zasilania budynków pojawia się szereg wątpliwości wynikających z oczekiwanego poziomu niezawodności dostaw energii eklektycznej. Brak wytycznych w tym zakresie często prowadzi do błędnego rozumienia tego problemu przez inwestora oraz projektanta. Natomiast wymagania dotyczące ochrony ppoż. wymagają przystosowania budynku eksploatowanego w warunkach normalnych do zasilania pożarowego, gdzie warunki środowiskowe znacznie różnią się od warunków normalnych. W tym przypadku pewność zasilania urządzeń przeciwpożarowych musi być wysoka gdyż od nich zależy bezpieczeństwo ewakuacji. W artykule zostały przedstawione zagadnienia związane ze stosowaniem źródeł zasilania w warunkach normalnych oraz ich adaptacją do zasilania budynku w warunkach pożaru. Poruszona została również problematyka ochrony przeciwporażeniowej dopuszczanej do stosowania w instalacjach przeciwpożarowych oraz zagrożeń stwarzanych przez akumulatory stosowane jako źródła zasilania rezerwowego z uwagi na ważność tych zagadnień w ogólnym rozumieniu bezpieczeństwa. Pominięta została problematyka doboru przewodów, której zostanie poświęcony osobny artykuł.

Wymagania dotyczące zasilania budynków zostały sprecyzowane w **Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie** (Dz. U. z 2015 roku poz.1422) [2].

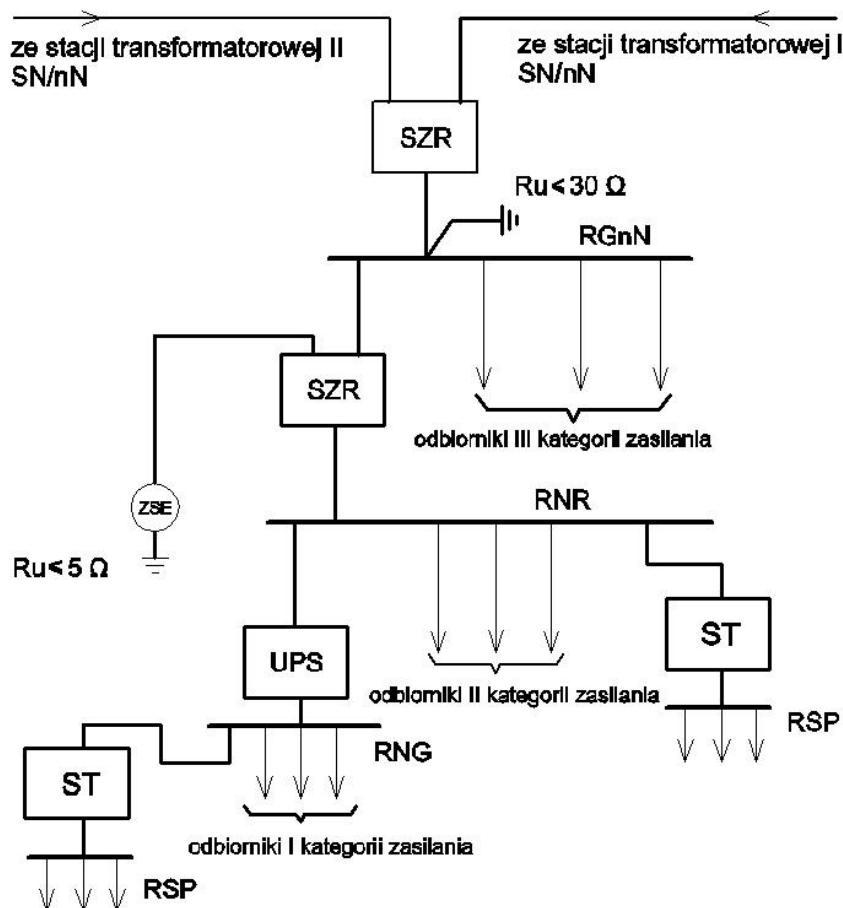
Zgodnie z § 181 pkt .1 Rozporządzenia [2]:

Budynek, w którym zanik napięcia w elektroenergetycznej sieci zasilającej może spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, poważne zagrożenie środowiska, a także znaczne straty materialne, należy zasiląć co najmniej z dwóch niezależnych, samoczynnie załączających się źródeł energii elektrycznej oraz wyposażać w samoczynnie załączające się oświetlenie awaryjne (zapasowe lub ewakuacyjne). W budynku wysokościowym jednym ze źródeł zasilania powinien być zespół prądotwórczy.

Są to bardzo ogólne wymagania, które nie precyzują wymagań w zakresie niezawodności zasilania oraz metodyki projektowania układów zasilania. W odniesieniu do innych obiektów budowlanych, obowiązujące przepisy techniczno-prawne wzmiankowo taktują wymagania dotyczące zasilania w energię elektryczną oraz milcząco traktują wymagania dotyczące układów zasilania i wymaganego poziomu niezawodności dostaw energii elektrycznej. Wyjątkiem w tym zakresie jest **Rozporządzenie Ministra Łączności z 21 kwietnia 1995 roku w sprawie zasilania energią elektryczną obiektów budowlanych łączności** (Dz. U. Nr 50/1995 poz. 271) [3]. Z uwagi na to, że jest to jedyny dokument formalno-prawny, precyzyjnie określający wymagania dotyczące zasilania obiektów budowlanych łączności, można na jego podstawie opracować koncepcję układu zasilania dowolnego budynku przedstawioną na **rysunku 1**. W prezentowanym układzie zasilania znajdują się wszystkie źródła zasilania, a ich stosowanie w określonym układzie zasilania może być przyjmowane w zależności od potrzeb i wymaganego poziomu niezawodności. Natomiast podział na poziomy rezerwowania oraz przypisane im źródła zasilania wynika z przyjętego w gospodarce elektroenergetycznej podziału na kategorie zasilanych odbiorników. Widoczny na **rysunku 1**, pojedynczy zespół prądotwórczy oraz pojedynczy zasilacz UPS, w zależności od potrzeb może być projektowany w układzie redundantnym lub w układzie pracy równoległej.

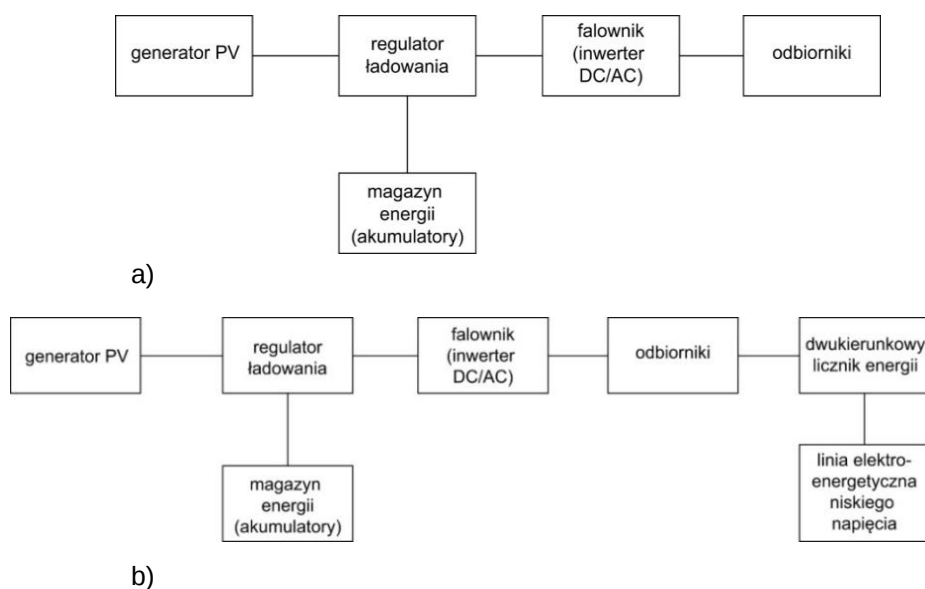
Coraz powszechniej w układach zasilania budynków pojawiają się generatory PV (pominięte na **rysunku 1**), które mogą funkcjonować autonomicznie lub synchronicznie z siecią elektroenergetyczną, do której oddają nadwyżkę wyprodukowanej energii. Schematy blokowe obydwu układów PV przedstawia **rysunek 2**. Generatory PV budowane są z paneli fotowoltaicznych, których budowę przedstawia **rysunek 3**. Charakterystykę prądowo-napięciową $I=f(U)$ pojedynczego ogniwa PV przedstawia **rysunek 4**. Łączenie szeregowo oraz równoległe paneli fotowoltaicznych pozwala na kształtowanie charakterystyki prądowo-napięciowej $I=f(U)$, której przebieg przedstawia **rysunek 5**.

Generator PV buduje się z połączonych równoległe gałęzi stanowiących połączone szeregowo panele fotowoltaiczne. Połączenie szeregowo pozwala na uzyskanie wymaganego napięcia (do wartości 1000 V dc) przy prądzie o wartości jaki wytwarza pojedynczy panel. Natomiast połączenie równoległe umożliwia uzyskanie żądanej wartości prądu dla uzyskania oczekiwanej mocy wyjściowej.



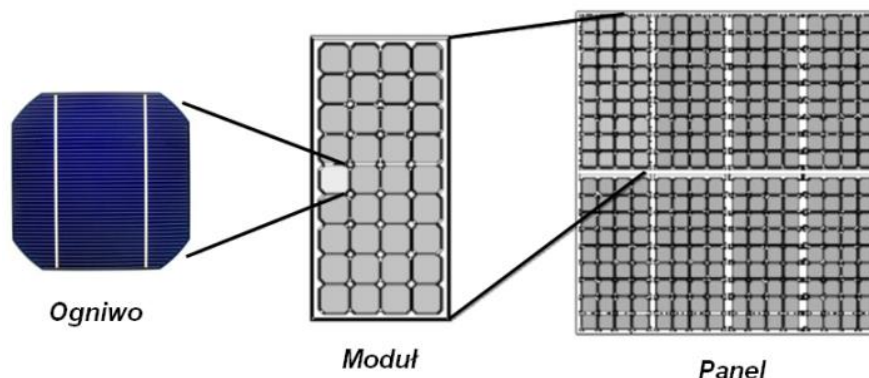
Rysunek 1: Schemat blokowo-ideowy zasilania budynku [27].

Kategoria III – długotrwała przerwa w zasilaniu nie powoduje wystąpienia negatywnych skutków w postaci zagrożenia życia lub dużych strat materialnych; **kategoria II** – dopuszcza się krótką przerwę niezbędną na uruchomienie zespołu prądotwórczego; **kategoria I** – nie dopuszcza się żadnej przerwy w zasilaniu; **ST** – siłownia telekomunikacyjna ac/dc; **RNR** – rozdzielnicza napięcia rezerwowanego; **RNG** – rozdzielnicza napięcia gwarantowanego.

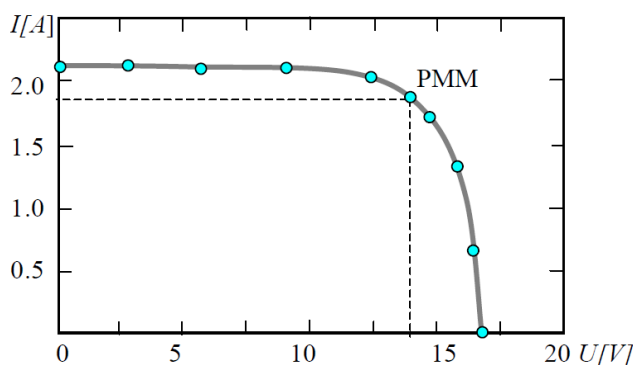


Rysunek 2: Schemat blokowy systemu PV[24]: a) autonomicznego; b) przyłączonego do sieci.

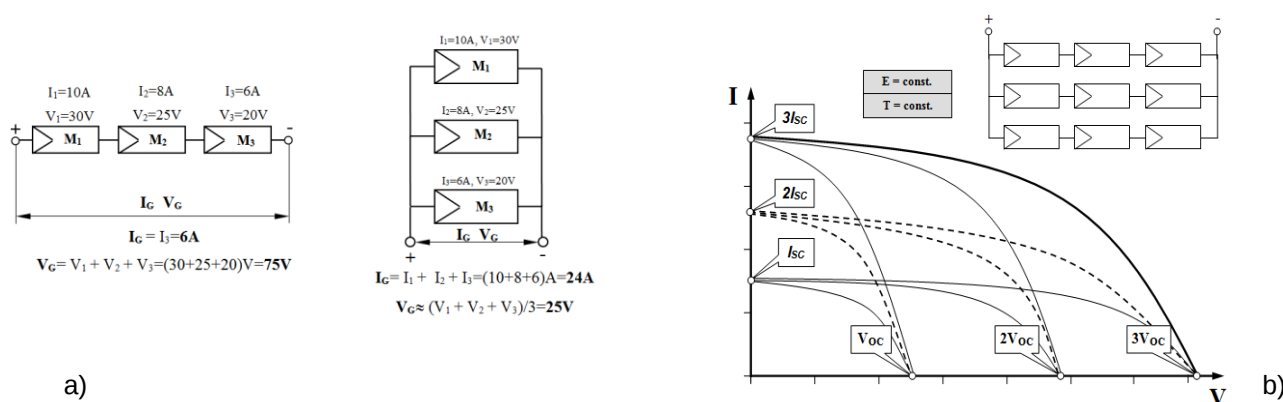
Występujący w układzie zasilania budynku generator PV wraz ze współpracującymi elementami tworzącymi system fotowoltaiczny, wymaga w wielu przypadkach magazynu energii. Stan ten powoduje konieczność zapewnienia neutralizacji zagrożeń wybuchowych stwarzanych przez mieszaninę powietrza z wodorem wydzielającym się z akumulatorów stanowiących wyposażenie magazynu energii. Wymagania w tym zakresie precyzuje norma **PN-EN 62040-1:2009 „Systemy bezprzerwowego zasilania (UPS). Część 1. Wymagania ogólne i wymagania dotyczące bezpieczeństwa UPS. Aneks M (normatywny). Wentylacja przedziałów bateryjnych”**. W praktyce sprowadza się to wykonania wentylacji sterowanej przez automatykę wyposażoną w układ detekcji stężenia wodoru, dzięki której nie dopuszcza się do przekroczenia 30% Dolnej Granicy Wybuchowości (**DGW**), która dla mieszaniny wodoru (H_2) z powietrzem wynosi 4 %.



Rysunek 3: Schemat budowy panelu fotowoltaicznego [21].



Rysunek 4: Charakterystyka prądowo-napięciowa $I = f(U)$ pojedynczego ogniwa PV z zaznaczonym punktem mocy maksymalnej PPM [33].



Rysunek 5: Metodyka tworzenia charakterystyki prądowo-napięciowej generatora PV[21]:

- a) połączenie szeregowe oraz równoległe,
- b) kształtowanie charakterystyki wyjściowej generatora PV.

W przeciwieństwie do wymagań dotyczących układów zasilania budynków w warunkach normalnej eksploatacji, wymagania dotyczące zasilania urządzeń przeciwpożarowych są precyzyjnie określone w przepisach techniczno-prawnych oraz normach przedmiotowych. W świetle **Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 roku, w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów** (Dz. U. Nr109/2010 poz. 719)[5], urządzenia przeciwpożarowe to stałe lub półstałe urządzenia uruchamiane ręcznie lub automatycznie, służące do:

- zapobiegania powstania pożaru,
- wykrywania powstałego pożaru,
- zwalczania pożaru lub ograniczania jego skutków.

Urządzenia te można podzielić na:

- wymagające zasilania do przejścia w stan pracy pożarowej,
- niewymagające zasilania do przejścia w stan pożarowy.

Zgodnie normą **PN-EN 12101-10:2007 „Systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła – część 10: Zasilanie”** [12], można przyjąć dwie klasy wymagań w zakresie zasilania urządzeń przeciwpożarowych:

- **klasa „A”**: wymagane jest zasilanie ze źródła podstawowego oraz źródła rezerwowego, co oznacza że od zasilanych urządzeń wymaga się zwiększonej pewności zasilania (np. wentylacja pożarowa, dźwiękowy system ostrzegawczy),
- **klasa „B”**: wymagane jest zasilanie tylko ze źródła podstawowego, co oznacza, że z chwilą wykrycia pożaru przez SSP lub wyłączenia dopływu energii przez przeciwpożarowy wyłącznik prądu, urządzenie automatycznie przechodzi w stan pracy pożarowej (np. zwalniaki elektromagnetyczne bram lub kurtyn przeciwpożarowych).

Ogólne wymagania dotyczące zasilania urządzeń przeciwpożarowych zostały określone w normie **PN-HD 60364-5-56:2013 „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Instalacje bezpieczeństwa”** [10]. Zagadnienia te są również określone w normie **PN-IEC 60364-5-56:1999 „Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Instalacje bezpieczeństwa”** [9], przeznaczonej do obowiązkowego stosowania z uwagi na przywołanie jej w Rozporządzeniu [2]). Norma ta jednoznacznie określa, że podstawowym źródłem zasilania jest sieć elektroenergetyczna lub inne źródło zasilania np. zespół prądotwórczy. Natomiast w przypadku zwiększonej pewności zasilania, jako źródło rezerwowe należy przyjmować:

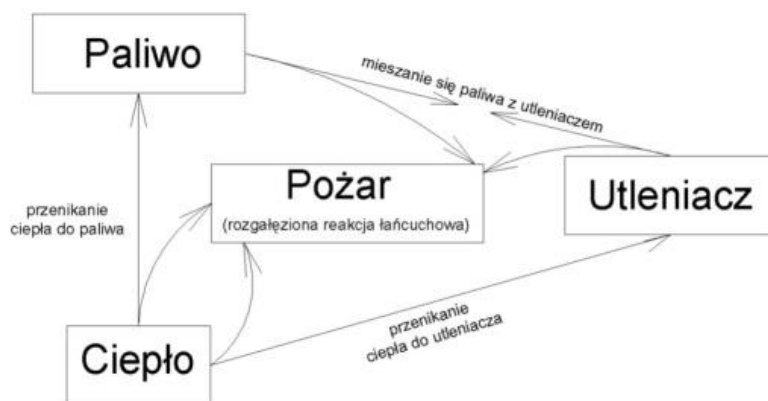
- akumulatory lub baterie akumulatorów, niezależnie od linii elektroenergetycznej oraz źródeł zasilania awaryjnego,
- zespoły prądotwórcze, niezależnie od linii elektroenergetycznej zasilania podstawowego,
- oddzielną linię elektroenergetyczną posiadającą część wspólną od napięcia 110 kV, czyli linię SN, wyprowadzoną z osobnej sekcji GPZ niż linia zasilania podstawowego.

Zgodnie z Ustawą o ochronie przeciwpożarowej (Dz. U. z 2017 roku poz. 736) [1], w instalacjach bezpieczeństwa mogą być stosowane wyłącznie wyroby budowlane, które uzyskały świadectwo dopuszczenia do instalowania w tych instalacjach. Wykaz wyrobów podlegających wymogom Ustawy [1] został zamieszczony w załączniku do **Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 20 czerwca 2007 roku w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochronie zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad wydawania dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania** (Dz. U. 2007 nr 143 poz. 1002 z późniejszymi zmianami)[4].

Rozporządzenie to wprowadziło do obowiązkowego stosowania następujące normy:

- **PN-EN 54-4: 2002 Systemy sygnalizacji pożarowej. Część 4: Zasilacze.** [11]
- **PN-EN 12101-10: 2007 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła. Część 10: Zasilacze.** [12]

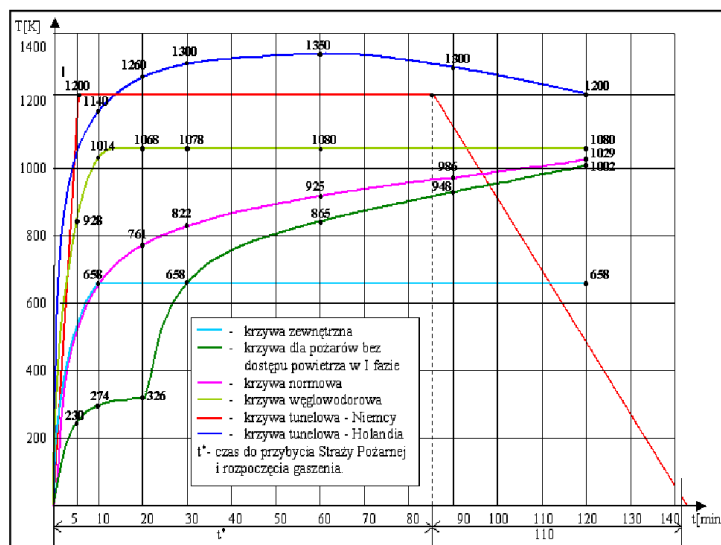
Zasilacz w/w normach określony jako UZS, musi posiadać świadectwo dopuszczenia, wydane przez **CNBOP-PIB w Józefowie k/Otwocka**. Zgodnie z postanowieniami normy [12] zasilacz UZS jest przeznaczony do pracy w początkowej fazie pożaru przez co wymagania dotyczące temperatury w jakiej prowadzi się badania nie przekraczają 75°C. Fakt ten budzi szereg kontrowersji gdyż niejednokrotnie praca urządzeń przeciwpożarowych odbywa się w znacznie większej temperaturze powstającej podczas pożaru, który stanowi niekontrolowany w czasie i przestrzeni proces spalania materiałów zachodzący poza miejscem do tego celu przeznaczonym. Do jego powstania niezbędne jest spełnienie warunków określanych mianem trójkąta pożarowego, zilustrowanego na **rysunku 6**. Spełnienie wszystkich czynników rozpoczyna proces fizykochemiczny nazywany spalaniem, w którym w wyniku zachodzącej z dostatecznie dużą szybkością reakcji chemicznej między paliwem a utleniaczem, wydziela się duża ilość energii. Towarzysząca mu reakcja łańcuchowa rodników, powoduje szybki wzrost wydzielanego ciepła oraz temperatury.



Rysunek 6: Trójkąt pożarowy [13].

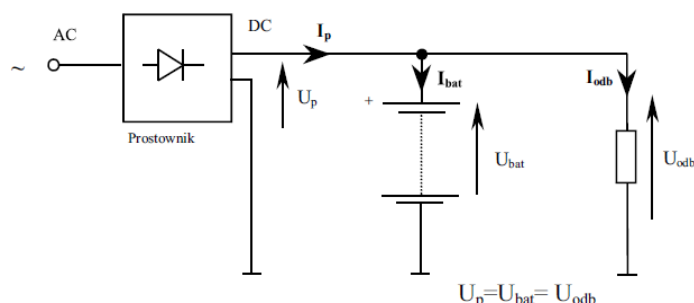
W celu zorientowania Czytelników w zakresie temperatur pożarowych, na **rysunku 7** zostały przedstawione krzywe pożarowe $T=f(t)$, zdefiniowane w normie **PN-EN 1363-2:2001 „Badanie odporności ogniowej. Część 2: Procedury alternatywne i dodatkowe.”**[14]

Powszechnie stosowane w instalacjach elektrycznych zasilacze UPS w praktyce nie posiadają świadectwa dopuszczenia do stosowania w instalacjach bezpieczeństwa, gdyż nie zostały wyszczególnione w załączniku do Rozporządzenia [4]. Brak świadectwa dopuszczenia skutkuje tym, że ze względów formalnych nie mogą być stosowane jako źródła zasilania rezerwowego urządzeń przeciwpożarowych, pomimo tego funkcjonalnie są równoważne zasilaczom zdefiniowanym w normach [11] oraz [12].



Rysunek 7: Krzywe pożarowe $T=f(t)$ określone w normie [31]

Akumulatory stosowane w urządzeniach przeciwpożarowych stanowią źródło zasilania gwarantowanego i przeznaczone są do pracy buforowej. Oznacza to, że akumulator przez cały czas połączony jest z prostownikiem i odbiornikiem. W czasie normalnej pracy zasilanie odbiornika realizowane jest z prostownika zasilacza UZS, który jednocześnie ładuje akumulator prądem o niewielkiej wartości powszechnie nazywanym prądem konserwującym. Oznacza to, że akumulator doładowywany jest w stopniu odpowiadającym jego samorozładowaniu. W tych warunkach akumulator pozostaje w gotowości do przejścia obciążenia na wypadek zaniku napięcia w obwodzie zasilającym prostownik, pozostając w stanie pełnego naładowania. Układ buforowej współpracy akumulatora z prostownikiem przedstawia poniższy **rysunek 8**.



Rysunek 8: Układ pracy buforowej akumulatora [25].

Dla akumulatora o pojemności Q [Ah] obowiązuje jednostka jednogodzinnego prądu rozładowania $1C$ [A] (spotyka się również oznaczenie C_1 lub I_1), określona następującym wzorem:

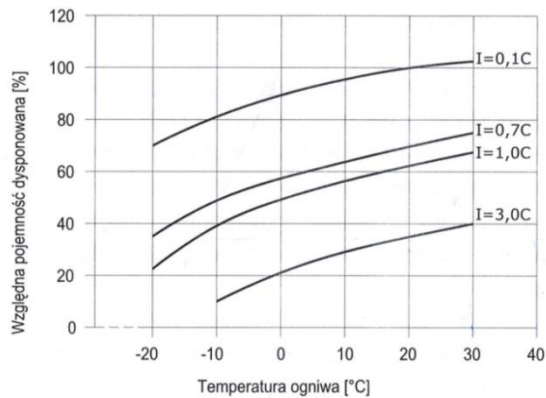
$$I_1 = C_1 = 1C [A] = \frac{Q [Ah]}{T = 1h}$$

Prąd rozładowania I_x (spotyka się oznaczenie C_x lub x^{-1} , gdzie: x - czas rozładowania w [h]) akumulatora o pojemności Q [Ah], dla dowolnego czasu T [h], należy określić z wykorzystaniem poniższego wzoru:

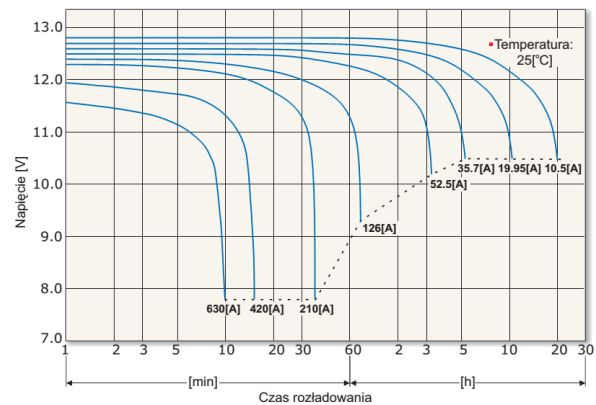
$$I_{x=T[h]} = \frac{1}{x} \cdot C = C_x = \frac{Q[Ah]}{T = x[h]} = [A]$$

Rzeczywista pojemność Q , akumulatora zależy od temperatury oraz prądu rozładowania (**rysunek 9a**). Przy rozładowaniu akumulatorów w celu zachowania jego deklarowanej przez producentów żywotności, nie można przekroczyć napięcia odcięcia U_k . Jego wartość ściśle zależy od wartości prądu rozładowania, z którym związany jest również czas trwania rozładowania (**rysunek 9b**). W centralach urządzeń przeciwpożarowych, dla których zaleca się obciążanie akumulatorów prądem o wartości $1,5C < I_x < 2C$, stosowane są baterie żelowe, gdzie elektrolit jest tiksotropową odmianą SiO_2 .

Są one odporne na przeładowanie, ale wrażliwe na zmiany temperatury i nieodporne na wysoką temperaturę podobnie jak akumulatory innego rodzaju.



a)

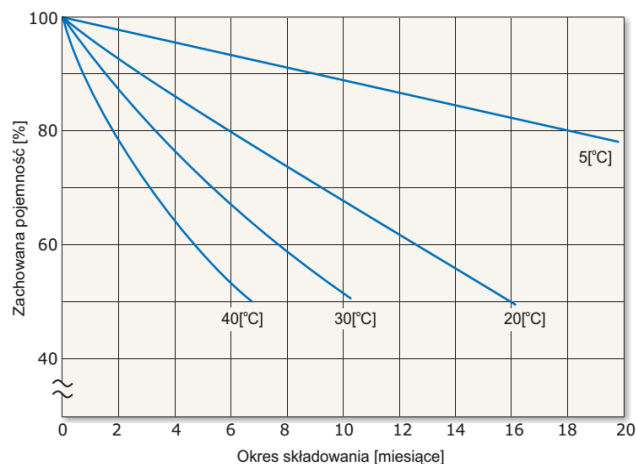


b)

Rysunek 9: Charakterystyki akumulatorów:

- a) zależność pojemności od prądu rozładowania i temperatury $Q=f(C_x; t)$ [30],
 b) krzywe rozładowania akumulatora w temperaturze 20°C [32].

Przekroczenie temperatury 55°C powoduje szybkie zniszczenie akumulatora. Dla przykładu na **rysunku 10** zostały przedstawione charakterystyki obrazujące utratę pojemności w zależności od temperatury podczas przechowywania.



Rysunek 10: Przykładowe charakterystyki samorozładowania akumulatorów SLA w funkcji czasu, dla różnych temperatur składowania [32].

Natomiast zespół prądotwórczy (ZP) stanowiący źródło zasilania awaryjnego zgodnie z normą **PN-EN 12101-10:2007** [8], powinien podać napięcie do 15 sekund od momentu zaniku napięcia w źródle podstawowym. Jest to wymóg nieuzasadniony z uwagi na parametry jakościowe napięcia w publicznych sieciach rozdzielczych, wynikające bezpośrednio z normy **PN-EN 50160:2010 „Parametry jakościowe napięcia w publicznych sieciach rozdzielczych”**[15]. Uruchomienie ZP powinno nastąpić po stwierdzeniu przerwy w zasilaniu a nie wskutek wystąpienia zapadu lub krótkiej przerwy, co jest dość powszechne w sieci elektroenergetycznej. Miarodajny jest czas 30 sekund, przyjmowany w praktyce. Z punktu widzenia eksploatacji, bardzo istotnym zagadnieniem jest wymagana ilość paliwa zgromadzonego w zbiorniku zespołu prądotwórczego, która umożliwi jego pracę przez czas określony w normie [8]:

- **4 godziny**, jeżeli ZP zasila wyłącznie urządzenia przeciwpożarowe i jest uruchamiany sygnałem alarmu pożarowego, lub jest wykorzystywany do zasilania pompowni pożarowej zgodnie z wymaganiami **Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 24 lipca 2009**

roku w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych (Dz. U. Nr 124/2009 poz. 1030) [7]

- **8 godzin**, jeżeli ZP jest uruchamiany po zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej,
- **72 godziny**, w każdym innym przypadku .

Zespół prądotwórczy może zasilать również inne odbiorniki nie będące elementami instalacji bezpieczeństwa, ale musi priorytetowo spełniać wymagania dla potrzeb instalacji bezpieczeństwa. Od takiego zespołu prądotwórczego wymaga się parametrów nie gorszych od klasy wymagań **G2** zdefiniowanych w normie **ISO8528-5 „Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądotwórcze”**[17].

Wyciąg z normy [17] przedstawiający podstawowe wymagania dla poszczególnych klas wymagań stawianych zespołom prądotwórczym w zakresie jakości produkowanej energii elektrycznej przedstawia **tabela 1**.

Zgodnie z **Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku „w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie”** (Dz. U. z 2015 roku poz. 1422) [2] w strefach pożarowych o kubaturze przekraczającej 1000 m³ lub zagrożonych wybuchem ($\Delta P \geq 5$ kPa – RMSW i A z dnia 7.06.2010 Nr 109 poz. 719)[5], istnieje obowiązek instalowania przeciwpożarowego wyłącznika prądu. Wyłącznik ten powinien odcinać dopływ energii elektrycznej do wszystkich odbiorników z wyjątkiem obwodów zasilających instalacje i urządzenia, których funkcjonowanie jest niezbędne podczas pożaru.

Do urządzeń tych należy zaliczyć:

- a) pompy pożarowe,
- b) dźwiękowy system ostrzegawczy,
- c) oświetlenie awaryjne i ewakuacyjne,
- d) dźwigi przeznaczone dla ekip ratowniczych,
- e) systemy technicznych zabezpieczeń pożarowych,
- f) wentylację pożarową (w tym zasilanie napędów klap dymowych),
- g) system alarmu pożarowego.

Tabela 1: najważniejsze wymagania graniczne wartości eksploatacyjnych przebiegów napięcia i częstotliwości dla poszczególnych klas wymagań zespołów prądotwórczych

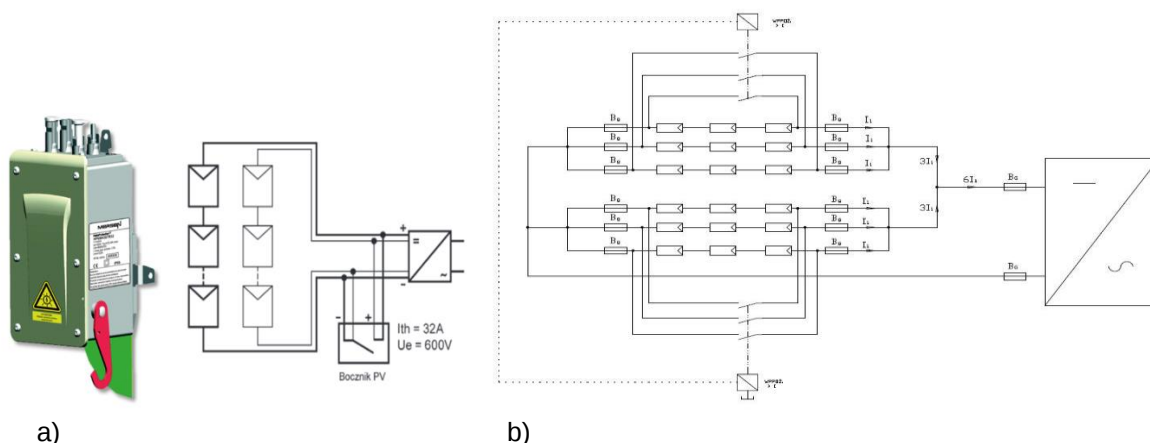
podlegającym klasie wymagań zespołów producentów

Parametr		Jednostka	Graniczna wartość eksploatacyjna, dla klasy wymagań			
			G1	G2	G3	G4
Spadek częstotliwości		%	≤ 8	≤ 5	≤ 3	Wartości parametrów należy uzgodnić z producentem zespołu
pasmo względnych zmian częstotliwości w stanach ustalonych		%	≤ 2,5	≤ 1,5	≤ 0,5	
Przebiegiowa odchyłka częstotliwości od wartości znamionowej	100% nagłego spadku mocy	%	≤ +18	≤ +12	≤ +10	
	Nagły wzrost mocy		≤ -15	≤ -10	≤ -7	
Czas odbudowania częstotliwości		s	≤ 10	≤ 5	≤ 3	
Odchyłka napięcia w stanie ustalonym		%	≤ ± 5 ¹⁾	≤ ± 2,5	≤ ± 1	
Przebiegiowa odchyłka napięcia	100% nagłego spadku mocy	%	≤ +35	≤ +25	≤ +20	
	Nagły wzrost mocy	%	≤ -25	≤ -20	≤ -15	
Czas odbudowania napięcia		s	≤ 10	≤ 6	≤ 4	

Uwaga Pełna zestaw wymagań został określony w normie PN-ISO8528-5

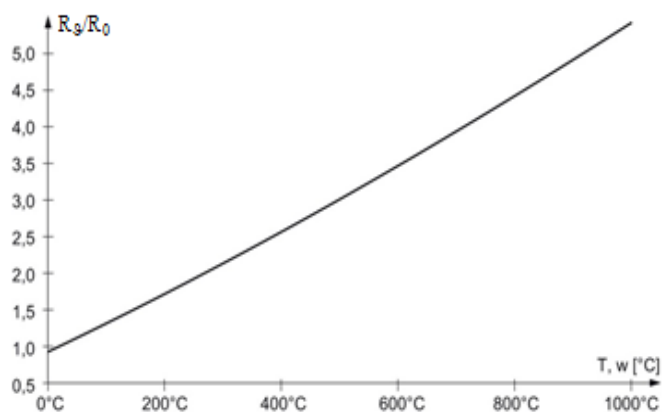
¹⁾ dla zespołów o mocy do 10 kVA: ≤ ± 10 %

W uzasadnionym przypadku każdą gałąź należy podzielić na sekcje w, których napięcie nie przekroczy napięcia dotykowego dopuszczalnego długotrwale i zastosować układ wyłączenia zgodny z ideą przedstawioną na **rysunku 12**.



Rysunek 12: Przykładowe układy wyłączenia pożarowego generatora PV: prostego [21], b) rozwiniętego.

W warunkach pożaru zmieniają się wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej. Głównym powodem odmiennego podejścia w tym zakresie w stosunku do instalacji funkcjonujących w warunkach normalnych jest zjawisko **Wiedemanna-Franza**, z którego wynika że pod wpływem temperatury rośnie przewodność cieplna i maleje przewodność elektryczna żył przewodzących przewodów zasilających urządzenia elektryczne. Zjawisko to negatywnie wpływa na jakość napięcia dostarczanego do zasilanych odbiorników oraz skuteczność ochrony przeciwporażeniowej zasilanych urządzeń, realizowanej przez samoczynne wyłączenie zasilania. Zakres względnych zmian rezystancji przewodów w temperaturze pożaru do rezystancji przewodu w temperaturze pokojowej, funkcji temperatury $R_g/R_0=f(T)$ przedstawia **rysunek 13**.



Rysunek 13: Zakres względnych zmian rezystancji przewodu funkcji temperatury [27].

Spodziewaną wartość rezystancji przewodu poddanego działaniu temperatury większej od temperatury pokojowej można wyznaczyć ze wzoru zaczerpniętego z normy [12]:

$$R_g = R_0 \cdot \left(\frac{T_g}{293} \right)^{1,16}$$

Gdzie:

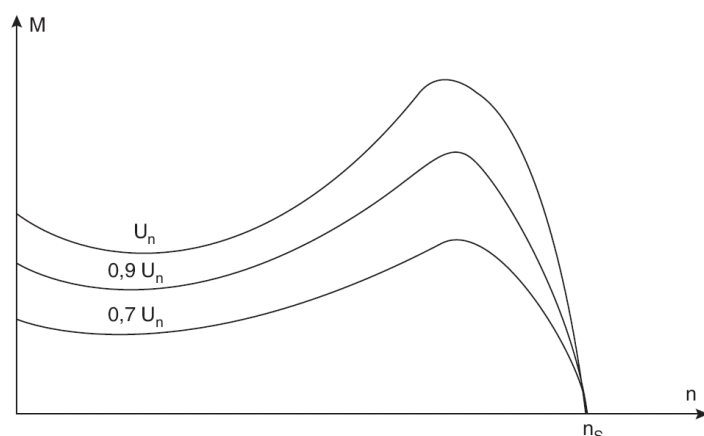
R_0 - rezystancją przewodu w temperaturze 20° C, w [Ω],

T_g - spodziewana temperatura, większa od temperatury pokojowej, w [K].

Wynika z tego, że wymagania określone w § 187 pk.2 Rozporządzenia [1], dotyczące zachowania ciągłości dostawy energii oraz sygnału są zbyt ogólne i nie uwzględniają szeregu problemów jakie pojawiają się w zakresie bezpieczeństwa i poprawności funkcjonowania zasilanych urządzeń. **Wzrost rezystancji przewodów podczas pożaru powoduje wzrost spadków napięć w obwodach zasilania oraz przekłada się na warunki ochrony przeciwporażeniowej.** Wzrost spadku napięcia powoduje zmianę warunków pracy urządzeń elektrycznych. Jako przykład należy przedstawić wpływ spadku napięcia na warunki pracy silnika elektrycznego, którego moment występujący na wale jest uzależniony od wartości napięcia zasilającego. Można to przedstawić następującą zależnością [24]:

$$M = M_n \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^2$$

Natomiast graficznie wpływ wartości napięcia zasilającego na wartość momentu silnika przedstawia **rysunek 14**.



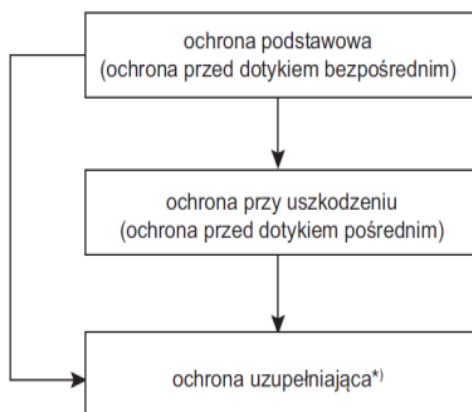
Rysunek 14: Wpływ wartości napięcia zasilającego na wartość momentu silnika [24].

Zatem wpływ tego negatywnego zjawiska należy uwzględnić na etapie doboru przewodów podczas projektowania instalacji elektrycznych budynku lub innego obiektu budowlanego.

Szczegółowo problem ten jest określony w normie **N SEP-E 005** [13]. W kwestii ochrony przeciwporażeniowej podstawowe wymagania dla instalacji elektrycznych nn zostały określone w normie **PN-HD 60364-4-41:2009** [15], zgodnie z którą każdy środek ochrony powinien składać się z:

- b) odpowiedniej kombinacji niezależnych środków zapewniających ochronę podstawową i ochronę przy uszkodzeniu lub,
- c) środka ochrony wzmocnionej zapewniającej ochronę podstawową i ochronę przy uszkodzeniu.

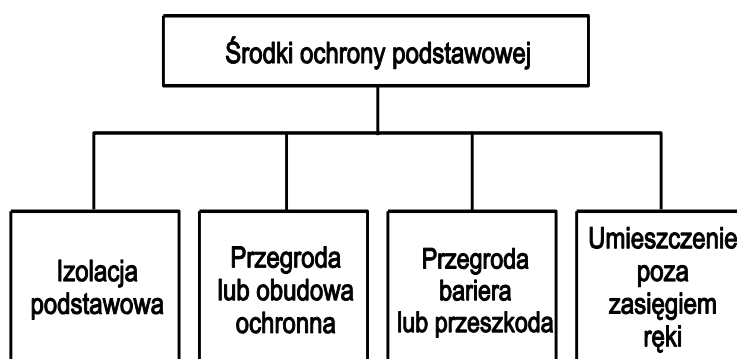
Wzajemne powiązania poszczególnych środków ochrony przedstawia **rysunek 15**.



Rysunek 15: Wzajemne powiązanie poszczególnych środków ochrony przeciwporażeniowej [27].

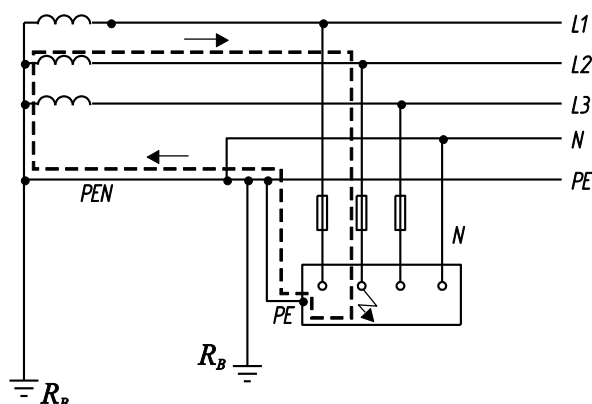
Spośród środków ochrony podstawowej przedstawionych na **rysunku 16**, w instalacjach elektrycznych które muszą funkcjonować w czasie pożaru, dopuszcza się jedynie **izolację podstawową** pod warunkiem spełnienia cechy ognioodporności przez wymagany czas np. 90 minut. Do środków ochrony przy uszkodzeniu, dopuszczonych do stosowania w instalacjach przewidzianych do funkcjonowania w czasie pożaru zgodnie z norma [13] należy zaliczyć:

- samoczynne wyłączenie zasilania w układzie TN (TN-S; TN-C-S; TN-C),
- samoczynne wyłączenie zasilania w układzie IT, pod warunkiem, że przy podwójnym zwarceniu automatycznie przekształci się on w układ zasilania TN,
- nieziemione połączenia wyrównawcze miejscowe,
- obniżenie napięcia dotykowego do wartości dopuszczalnej długotrwale.



Rysunek 16: Wzajemne powiązanie poszczególnych środków ochrony przeciwporażeniowej [25].

Ograniczenie wyboru układu zasilania wynika bezpośrednio z **tabeli 2**, w której podane zostały dopuszczalne czasy samoczynnego wyłączenia. Na **rysunku 17** został przedstawiony obwód zwarcia w układzie zasilania TN-C-S, który jest powszechnie stosowany w budynkach.



Warunek samoczynnego wyłączenia zasilania:

$$I_k = \frac{U_0}{Z_T + Z_p} \geq I_a$$

I_a – prąd wyłączający w czasie wymaganym przez normę [14]

U_0 – napięcie pomiędzy przewodem fazowym a przewodem PE lub PEN

I_k – spodziewany prąd zwarcia jednofazowego

Z_T – impedancja uzwojeń transformatora

Z_p – impedancja przewodów obwodu zwarciego

Rysunek 17: Obwód zwarcia w układzie zasilania TN-C-S [27]

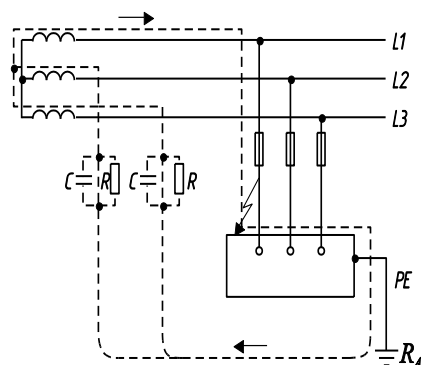
Układ zasilania IT (**rysunek 18**) może być stosowany jedynie wtedy gdy przy drugim zwarciu przejdzie w układ zasilania TN, a samoczynne wyłączenie zasilania nastąpi w czasie nie dłuższym od określonego w normie **PN-HD 60364-4-41:2009**[15] (pojedyncze zwarcie – **rys. 18a**, nie stwarza zagrożenia porażeniowego). Spełnienie tego wymagania jest możliwe jedynie przy zastosowaniu uziemienia zbiorowego (**rysunek 19**). Takie rozwiązanie pozwala na pominięcie odczytu wskaźników Układu Kontroli Stanu Izolacji (UKSI), który w warunkach pożaru staje się nieprzydatny.

Układ zasilania TT (**rysunek 20**) w instalacjach, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie akcji ratowniczo-gaśniczej nie może być stosowany z uwagi na stwarzane zagrożenia porażeniowe. W czasie zwarcia, prąd płynie w obwodzie obejmującym przewody oraz uziemienia R_A i R_B w przeciwieństwie do układu zasilania TN, gdzie płynął wyłącznie przewodami. Obwód zwarciovowy w tym przypadku tworzy dzielnik napięciowy, w którym na rezystancji R_A odkłada się napięcie o wartości bliskiej napięciu U_0 (napięcie pomiędzy przewodem fazowym a uziemionym przewodem ochronnym). Dzięki się tak ponieważ rezystancja oporów uziemienia roboczego i ochronnego ($R_A + R_B$) występująca w obwodzie zwarcia jest znacznie większa od rezystancji pozostałej części obwodu zwarciovowego, na którą składa się suma impedancji uzwojenia transformatora oraz impedancja przewodów stanowiących część obwodu zwarciovowego. Duże wartości rezystancji uziomów powodują, że mogą powstać trudności w spełnieniu wymagań samoczynnego wyłączenia i konieczne będzie zastosowanie wyłączników różnicowoprądowych, których stosowania w instalacjach funkcjonujących w czasie pożaru kategorycznie zabrania norma **N SEP-E 005 „Dobór przewodów elektrycznych do zasilania urządzeń, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru”**[13], co do której obecnie trwają prace w Komitecie Normalizacyjnym IEC nad implementacją jej zapisów do normy[10].

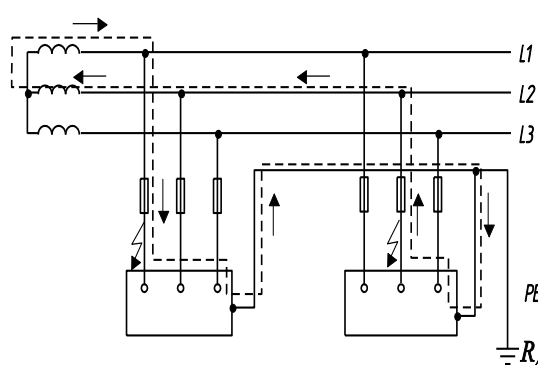
Tabela 2: Dopuszczalne czasy samoczynnego wyłączenia poszczególnych układach zasilania, określone w normie PN-HD 60364-4-41:2009 [28].

Układ sieci	50 V < $U_0 \leq 120$ V, w [s]		120 V < $U_0 \leq 230$ V, w [s]		230 V < $U_0 \leq 400$ V, w [s]		$U_0 > 400$ V, w [s]	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
TN	0,8	Wyłączenie może być wymagane z innych przyczyn niż ochrona przeciwporażeniowa	0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3		0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Objaśnienia: U_0 – nominalne napięcie ac lub dc przewodu liniowego względem ziemi



a)

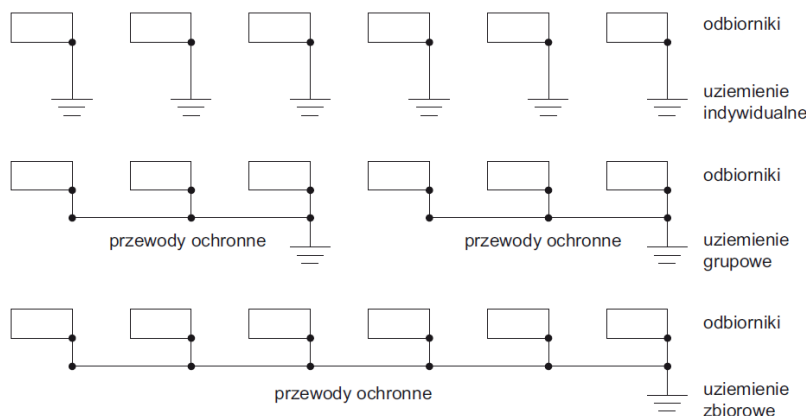


b)

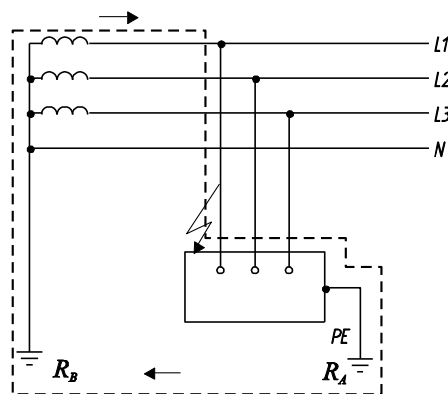
Warunek samoczynnego wyłączenia:

- dla układu zasilania bez przewodu neutralnego
$$I_k = \frac{U_n}{2 \cdot Z_s} \geq I_a$$
- dla układu zasilania zawierającego przewód neutralny
$$I_k = \frac{U_0}{2 \cdot Z_s} \geq I_a$$

Rysunek 18: Układ zasilania IT: a) pojedyncze zwarcie; b) podwójne zwarcie [28].



Rysunek 19: Sposoby uziemienia w układzie zasilania IT [28].



Warunek samoczynnego wyłączenia:

$$I_k = \frac{U_0}{R_A + R_B + Z_T + Z_p} \geq I_a$$

- przy zabezpieczeniu nadprądowym

$$(R_A + R_B) \gg (Z_T + Z_p)$$

- przy zabezpieczeniu różnicowoprądowym

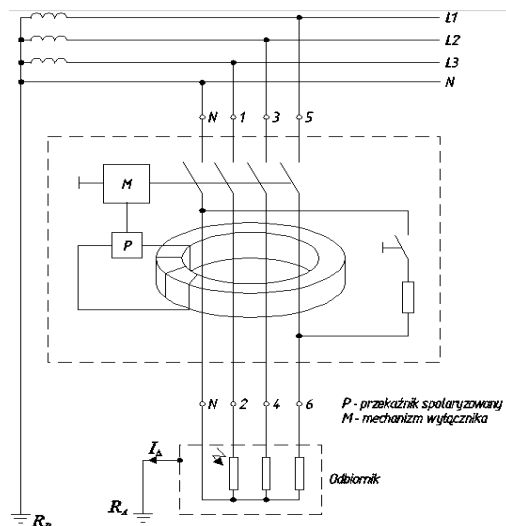
$$I_{\Delta} = \frac{U_L}{R_A} \geq I_{\Delta n}$$

Rysunek 20: Obwód zwrcia w układzie zasilania TT [28] wraz z warunkami samoczynnego wyłączenia przy zabezpieczeniu nadprądowym oraz wyłącznikiem różnicowoprądowym.

Zakaz stosowania wyłączników różnicowoprądowych w instalacjach bezpieczeństwa, zawarowany w normie [13], wyjaśnia analiza **rysunku 21**, na którym została przedstawiona uproszczona budowa wyłącznika różnicowoprądowego.

Pod działaniem temperatury pożaru jonizacji ulega izolacja przewodów skutkując zwiększonymi prądami upływu doziemnego, które mogą prowadzić do niekontrolowanego działania wyłączników różnicowoprądowych prowadząc do pozbawienia funkcji zasilanych urządzeń. Zjawisko to powoduje, że wyłącznik różnicowoprądowy nie nadaje się do stosowania w obwodach zasilających urządzenia przeciwpożarowe, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru. Nie stosuje się tego typu zabezpieczeń również w innych obwodach bezpieczeństwa z uwagi na wymaganą niezawodność.

Przewody w instalacjach przeciwpożarowych należy dobierać zgodnie z wymaganiami norm przedmiotowych w korelacji z wymaganiami normy [13].

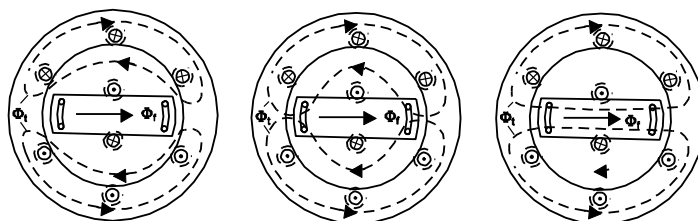


Warunek poprawnego funkcjonowania zabezpieczenia: $(I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) - I_N \geq (0,5 - 1)I_{\Delta n}$
 I_{L1} ; I_{L2} ; I_{L3} – prądy w przewodach fazowych; I_N – prąd w przewodzie neutralnym;
 $I_{\Delta n}$ – znamionowy p-rąd różnicowy

Rysunek 21: Uproszczona budowa wyłącznika różnicowoprądowego, zainstalowanego w układzie zasilania TT [28]

W instalacjach elektrycznych poważnym problemem jest zachowanie ochrony przeciwporażeniowej przy zasilaniu z generatora zespołu prądotwórczego, gdzie impedancja źródła ulega zmianie wraz z upływem czasu trwania zwarcia.

W chwili wystąpienia zwarcia ulega zmianie rozpył strumieni magnetycznych w generatorze zespołu prądotwórczego, którego przebieg wraz z upływem czasu przedstawia **rysunek 22**.



Rys. 22: Przebieg wypychanego poza wirnik strumienia stojana: a) stan podprzejściowy, b) stan przejściowy, c) stan ustalony

W początkowej fazie zwarcia nazywanej stanem podprzejściowym, w skutek działania klatki tłumiącej, strumień główny wytwarzany przez prądy płynące w uzwojeniu stojana jest wypychany poza wirnik (**rys. 22a**). W stanie tym reaktancja generatora charakteryzuje się małą wartością, wynoszącą przeciętnie (10 – 15)% wartości reaktancji generatora w stanie statycznym.

Stan ten trwa bardzo krótko ze względu na małą wartość elektromagnetycznej stałej czasowej T obwodu zwarcia, wynoszącej dla generatorów nn, średnio 0,01 s.

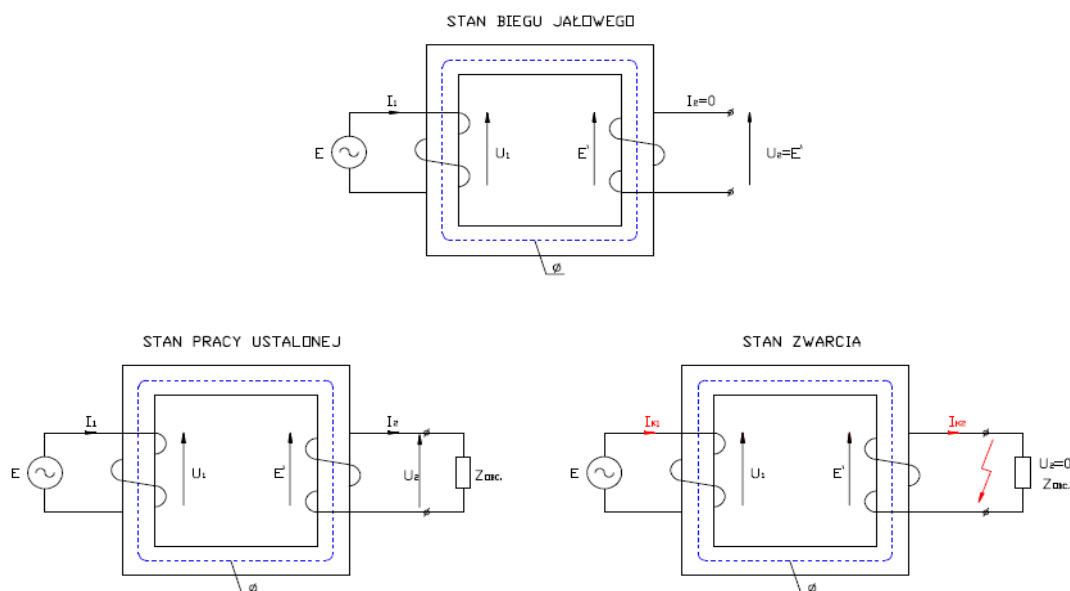
Działanie klatki tłumiącej ze względu na małą wartość jej rezystancji szybko ustaje, co skutkuje powolnym wchodzeniem strumienia głównego w wirnik. Stan ten nazywany stanem przejściowym (**rys. 22b**) charakteryzuje wzrost reaktancji generatora, która dla generatorów nn wynosi średnio (30- 40)% wartości reaktancji znamionowej generatora.

Generator w krótkim czasie przechodzi w stan ustalony zwarcia, co objawia się dalszym wzrostem reaktancji obwodu zwarciego. W stanie ustalonym zwarcia strumień główny oraz strumień wzbudzenia zamykają się w przez wirnik generatora (**rys. 22c**). Ponieważ kierunki tych strumieni są przeciwne, strumień wypadkowy ulega sinemu zmniejszeniu. Zjawisko to prowadzi do gwałtownego wzrostu reaktancji generatora, która dla generatorów nn wynosi (200 – 300)% wartości reaktancji statycznej generatora. W celu porównania zachowania się transformatora i generatora w czasie zwarcia, na **rysunku 23** przedstawiono przebieg strumienia magnetycznego w transformatorze dwuuzwojeniowym w różnych stanach pracy.

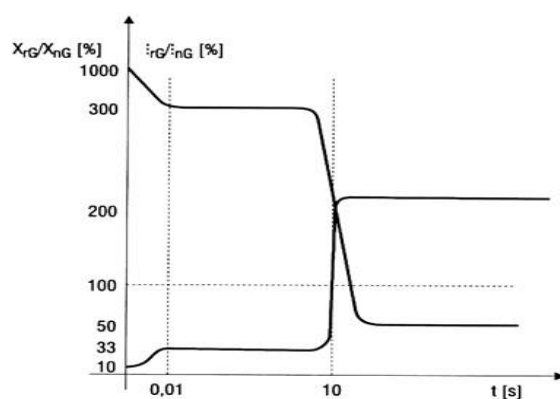
Z rysunku tego wynika, że droga strumienia magnetycznego nie ulega zmianie przez co parametry zwarcia transformatora pozostają niezmiennie w czasie zwarcia.

W zespołach prądotwórczych konstruowanych obecnie, instalowany jest regulator prądu wzbudzenia wyposażony w układ forsowania, który pozwala podczas zwarcia na utrzymanie określonej wartości reaktancji generatora.

Wartość ta charakteryzowana jest krotnością prądu znamionowego generatora, utrzymywaną przez czas nie dłuższy niż 10 s (najczęściej: $3 \cdot I_{nG}$). Ograniczenie czasowe utrzymywania określonej wartości reaktancji generatora podczas zwarcia wynika z warunku wytrzymałości izolacji uzwojeń generatora. Wydłużenie tego czasu może skutkować zniszczeniem izolacji uzwojeń generatora. Przebieg zmienności impedancji generatora podczas zwarcia oraz zmienność prądów zwarcia przedstawia **rysunek 24**.



Rysunek 23: Przebieg drogi strumienia magnetycznego w transformatorze dwuuzwojeniowym różnych stanach jego pracy



Rysunek 24: Unormowany przebieg zmienności impedancji generatora zespołu prądotwórczego podczas zwarcia oraz zmienności prądu zwarcia

Zjawisko to powoduje, że pomimo działania układu forsowania wzbudzenia, impedancja generatora zespołu prądotwórczego jest znacznie większa od impedancji transformatora elektroenergetycznego przyłączonego do Systemu Elektroenergetycznego o takiej samej mocy jak moc zespołu prądotwórczego. Ponieważ impedancja transformatora oraz impedancja generatora zespołu prądotwórczego w czasie działania automatyki forsowania wzbudzenia generatora (10 s, od powstania zwarcia) wyraża się następującymi wzorami:

$$Z_{k1G} \approx X_{k1G} = \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}}$$

$$Z_T = x_k \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}$$

stosunek parametrów zwrciowych tych źródeł przy jednokowych mocach ($S_{nG}=S_T$), wyniesie:

$$Z_{k1G} / Z_T = \frac{1}{x_k \cdot n} = \begin{cases} 7,4 /_{x_k=0,045; n=3} \Leftrightarrow S_T \leq 400 \text{ kVA} \\ 5,6 /_{x_k=0,06; n=3} \Leftrightarrow S_T \geq 630 \text{ kVA} \end{cases}$$

gdzie:

Z_T – impedancja transformatora, w $[\Omega]$

Z_{k1G} – impedancja generatora zespołu prądowórczego w czasie funkcjonowania automatyki forsowania wzbudzenia, w $[\Omega]$

n – krotność prądu znamionowego generatora zespołu prądowórczego podcza zwrć na zaciskach generatora,

podwana przez producenta zespołw DTR, w $[-]$

U_{nT} – napięcie nominalne transformatora, w $[\text{kV}]$

U_{nG} – napięcie nominalne generatora zespołu prądowórczego, w $[\text{kV}]$

S_{nT} – znamionowa moc pozorna transformatora, w $[\text{MVA}]$

S_{nG} – znamionowa moc pozorna generatora zespołu prądowórczego, $[\text{MVA}]$

x_k – napięcie zwrcia transformatora: $x_k = 0,045$ dla $S \leq 400 \text{ kVA}$; $x_k = 0,06$ dla $S \geq 500 \text{ kVA}$

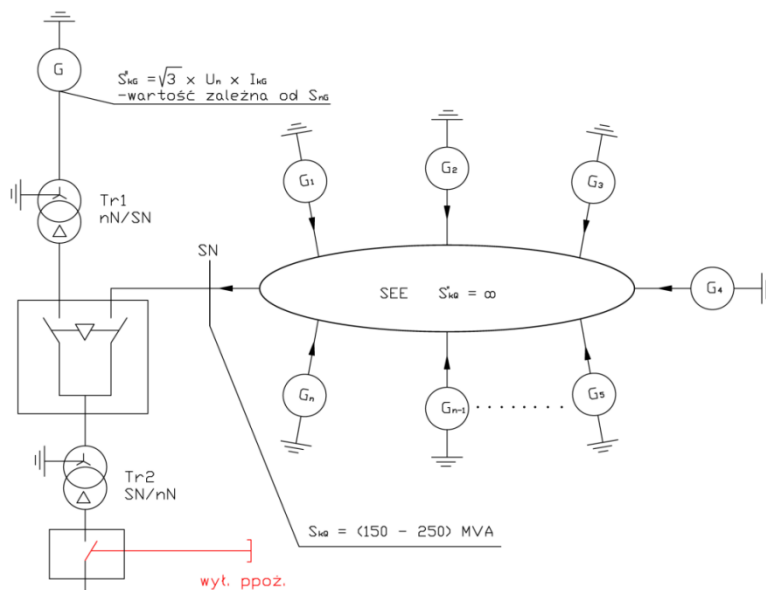
Po ustaniu działania automatyki forsowania wzbudzenia kiedy zwarcie przechodzi w stan ustalony (reaktancja generatora wzrasta o 300% w stosunku do wartości znamionowej), stosunek impedancji tych źródeł wyniesie odpowiednio: **22** lub **16,7**.

Przy takich warunkach zasilania może się okazać, że ochrona przeciwporażeniowa przez samoczynne wyłączenie przy zasilaniu z generatora zespołu prądowórczego w warunkach pożaru (bez zastosowania wyłączników różnicowoprądowych, których stosowania kategorycznie zabrania norma N SEP-E 005 [13]) jest nieskuteczna.

Przyczyną tego stanu jest ograniczona wartość mocy zwarciowej generatora zespołu prądowórczego

$$S_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{nG} \cdot I_{kG}'' = \sqrt{3} \cdot U_{nG} \cdot 3 \cdot I_{nG} \text{ w stosunku do mocy Systemu}$$

Elektroenergetycznego (SEE), szacowanej w przybliżeniu jako „nieskończona”, co symbolicznie zostało przedstawione na **rysunku 25**.



Rysunek 25: Porównanie mocy zwrciowych SEE i zespołu prądowórczego.

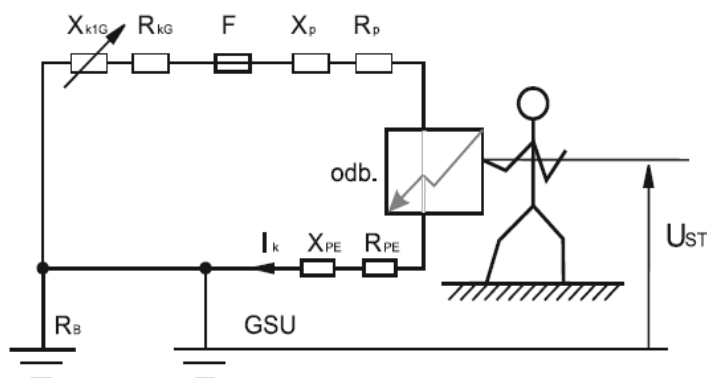
W tabeli 2 podano moce zwarciove wybranych zespołów prądoworczych nn.

Tabela 2: Moce zwarciove wybranych zespołów prądoworczych nn

Moc znamionowa zespołu prądoworczego [kVA]	Moc zwrciova na caciskach generatora zespołu prądoworczego, w [MVA] przy: $I_k'' = 3 \cdot I_{nG}$
100	0,3
200	0,6
500	1,5
1000	3,0
2000	6,0
6000	18,0

W takim przypadku pomocne może być sterowanie wartością spodziewanego napięcia dotykowego U_{ST} , tak by jego wartość nieprzekraczała wartości napięcia dotykowego dopuszczalnego długotrwale U_L . Postępowanie takie jest zgodne z normą [13], a sposób realizacji tego zalecenia (przy uproszczonym założeniu: $Z_{PE} \approx R_{PE}$) wyjdzie z rysunku 26. Dokładna analiza rysunku 26 oraz zamieszczonych przy nim wzorów, prowadzi do oceny dwóch przypadków:

- jeżeli $I_k < I_a$ – czy spodziewane napięcie dotykowe U_{ST} jakie powstanie na częściach przewodzących dostępnych chronionego urządzenia, w warunkach zakłóconych nie przekroczy napięcia dotykowego dopuszczalnego długotrwale U_L ?
- jeżeli $I_k \geq I_a$ – czy nastąpi samoczynne wyłączenie zasilania w czasie nie dłuższym od określonego w normie PN-HD 60364-4-41:2009 [15]?



$$U_{ST} = I_a \cdot R_{PE} \cdot k_p \leq U_L$$

$$R_{PE} = \frac{l \cdot k_p}{\gamma \cdot S_{PE}}$$

$$U_L \geq \frac{I_a \cdot l \cdot k_p}{\gamma \cdot S_{PE}}$$

$$S_{PE} \geq \frac{I_a \cdot l \cdot k_p}{\gamma \cdot U_L}$$

Rysunek 26: Metodyka wyznaczania przekroju przewodu ochronnego S_{PE} łączącego chronione urządzenie z GSU, dla spełnienia warunku $U_{ST} \leq U_L$ [13]

Gdzie:

U_{ST} – spodziewana wartość napięcia dotykowego;

GSU – główna szyna uziemiająca;

S_{PE} – minimalny przekrój przewodu ochronnego, gwarantujący spełnienie warunku $U_{ST} \leq U_L$;

k_p – współczynnik korekcyjny uwzględniający wpływ temperatury pożaru, którego sposób wyznaczenia określa norma [13];

l – długość przewodu łączącego odbiornik z GSU;

I_a – prąd wyłączający zabezpieczenie w czasie wymaganym przez normę [15];

R_{PE} – rezystancja przewodu ochronnego

γ – konduktywność przewodu ochronnego łączącego chroniony odbiornik z GSU).

Przyjęcie takiego sposobu rozwiązania ochrony przeciwporażeniowej gwarantuje jej zachowanie przy dowolnej wartości spodziewanego prądu zwarciovego I_k .

Kolejnym ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa jest rezystancja wewnętrzna akumulatora, która ma wpływ na wydatki prądowe narzucające wymagania w zakresie odporności zwarciowej dobieranych aparatów elektrycznych. Ma ona szczególne znaczenie dla krótkich czasów rozładowań. Wartość rezystancji wewnętrznej akumulatora jest bardzo mała i wynosi:

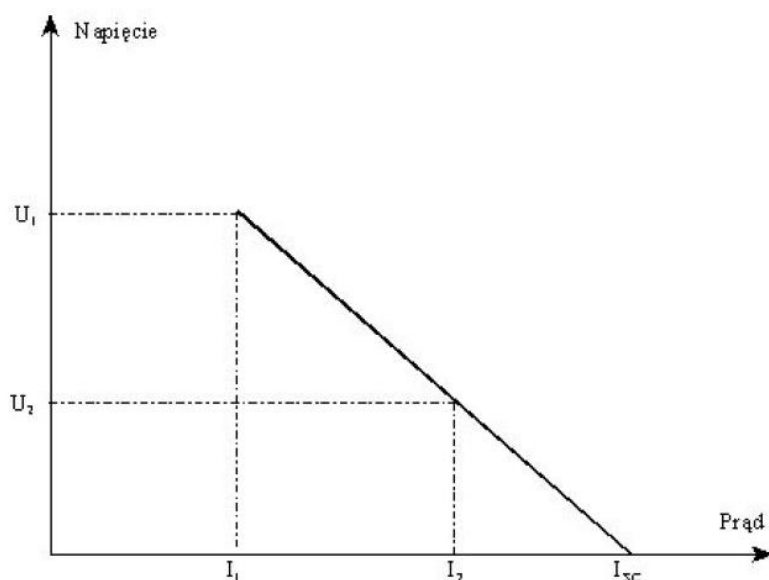
- (1-3) mΩ/100 Ah dla akumulatorów klasycznych,
- (0,5-3) m/100 Ah dla akumulatorów VRLA.

Producenci podają rezystancję wewnętrzną dla akumulatorów nowych. Jest ona obliczana na podstawie pomiarów dwóch punktach zgodnie z **rysunkiem 27**.

Pierwszy pomiar prądu i napięcia wykonuje się po czasie (20-25) [s], od momentu załączenia akumulatora na rozładowanie prądem o wartości **(4-6)·C₁₀**. Drugi pomiar prądu i napięcia wykonuje się przy rozładowaniu akumulatora wykonywanym po pierwszej próbie z opóźnieniem trwającej (2-5) [minut], prądem o wartości **(20-40)·C₁₀**.

Rezystancję akumulatora zgodnie z wymaganiami norm [19] oraz [20] wyznacza się z następującego wzoru:

$$R_w = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}$$



Rysunek 27: algorytm obliczania rezystancji wewnętrznej akumulatora [25]

Producenci akumulatorów w kartach katalogowych podają charakterystyki stałoprądowego oraz stałomocowego rozładowania. Charakterystyki te są analogiczne i podawane w postaci tabel, których przykłady dla akumulatora o pojemności 210 Ah przedstawiają **tabela 3** oraz **tabela 4**.

Tabela3: Przykład stałoprądowej charakterystyki rozładowania akumulatora o pojemności 210 Ah w temperaturze 25^o C, prąd w [A] [34]

U _k [V/ogn.]	5 [min.]	10 [min.]	15 [min.]	30 [min.]	50 [min.]	1 [h]	2 [h]	4 [h]	6 [h]	8 [h]	10 [h]
1,80	506,0	414,0	340,0	226,0	146,0	128,0	70,0	41,10	30,30	23,69	19,65
1,75	596,0	448,0	356,0	234,0	151,0	132,0	71,80	41,80	30,80	24,04	19,95
1,70	633,0	465,0	367,0	240,0	154,0	135,0	72,80	42,10	31,00	24,17	20,05
1,65	662,0	476,0	375,0	243,0	156,0	136,0	73,40	42,30	31,10	24,23	20,10
1,60	684,0	485,0	383,0	246,0	157,0	138,0	74,00	42,50	31,10	24,26	20,10
1,50	711,0	495,0	390,0	248,0	159,0	139,0	74,60	42,70	31,20	24,26	20,11

Tabela 4: Przykładowa charakterystyka stałomocowego rozładowania akumulatora o pojemności 210 Ah, w temperaturze 25^o C, moc w [W/ogniwo] [34]

U _k [V/ogn.]	5 [min.]	10 [min.]	15 [min.]	30 [min.]	50 [min.]	1 [h]	2 [h]	4 [h]	6 [h]	8 [h]	10 [h]
1,80	935,3	783,7	651,7	444,0	289,3	254,8	140,0	82,2	60,7	47,4	39,3
1,75	1082,5	848,8	681,8	461,0	262,3	262,3	143,7	83,7	61,7	48,1	39,9
1,70	1150,0	879,5	702,8	471,5	267,2	267,2	145,5	84,2	62,0	48,3	40,1
1,65	1201,8	900,5	719,0	478,0	270,3	270,3	146,8	84,7	62,2	48,5	40,2
1,60	1241,7	918,7	733,3	483,0	273,0	273,0	148,0	85,0	62,3	48,5	40,2
1,50	1291,3	936,8	748,2	487,8	275,7	275,7	149,2	85,3	62,3	48,5	40,2

Baterie akumulatorów stosowanych w zasilaczach UPS oraz innych urządzeniach o podobnym charakterze powinny być dobierane do mocy znamionowej zasilacza. Za podstawę doboru należy przyjąć wymaganą moc czynną/ogniwo, którą należy wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$P_{ognwym} = \frac{S \cdot \cos \varphi_z}{\eta \cdot n \cdot k_x}$$

gdzie:

P_{ogn} – wymaga moc czynna pojedynczego ogniwa przy stałomocowym rozładowaniu akumulatora do określonego napięcia odcięcia U_k, w [W/ogniwo]

S – znamionowa moc pozorna zasilacza UPS, w [VA]

cosφ_z – współczynnik mocy, przy którym pracuje zasilacz UPS (współczynnik mocy zasilanych odbiorników, w [-])

η - sprawność zasilacza UPS, w [-]

n - liczba ogni w akumulatorze (przy napięciu akumulatora 12 V – 6 ogni; przy napięciu akumulatora 6 V – 3 ogni)

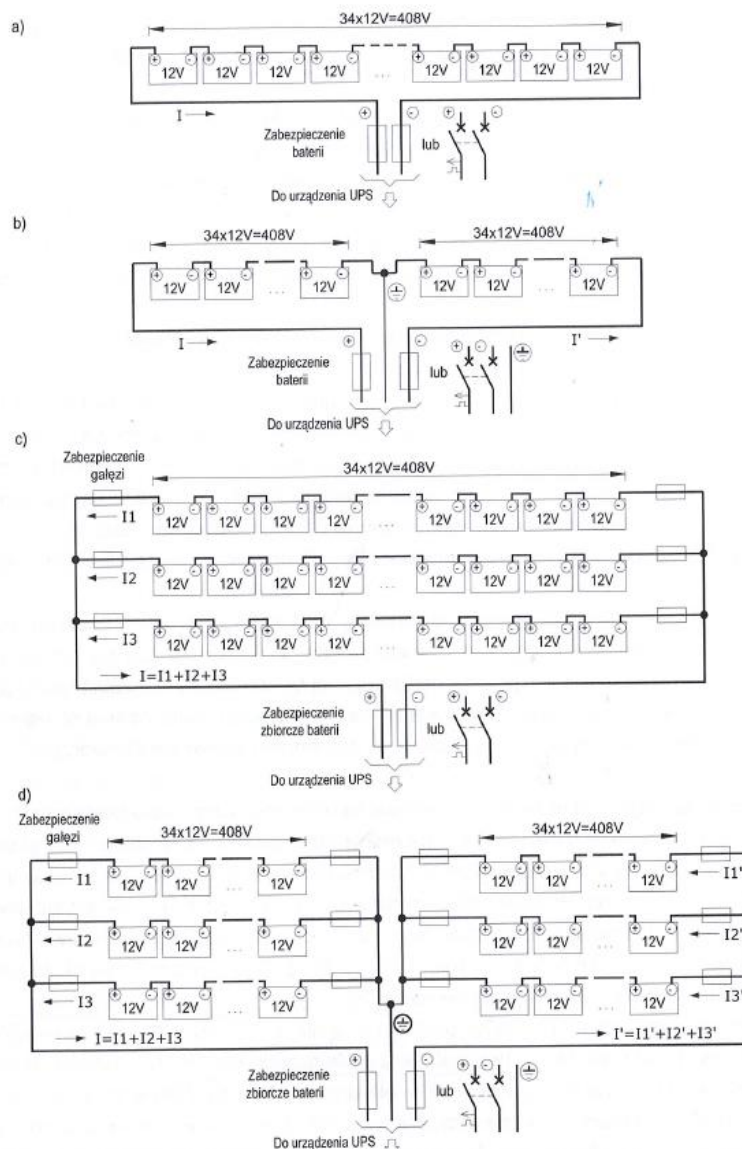
U_{n UPS} – napięcie znamionowe zasilacza UPS, w [V]

U_{n akum.} – napięcie znamionowe akumulatora, w [V]

k_x = $\frac{U_{n UPS}}{U_{n akum}}$ - wymagana liczba akumulatorów w pojedynczej gałęzi szeregowej, w [-]

W razie potrzeby akumulatory łączy się równolegle w celu zwiększenia ich pojemności lub szeregowo w celu zwiększenia napięcia. Przykładowe warianty układu baterii akumulatorów przedstawia **rysunek 28**.

Baterie akumulatorów powinny być budowane z ogni tego samego typu, pochodzących z tej samej serii produkcyjnej ze względu na rezystancję wewnętrzną, która decyduje o równomierności rozplywu prądów w poszczególnych gałęziach. Zaleca się instalowanie zabezpieczenia zwarciovego w każdym biegunie każdej gałęzi, możliwie blisko akumulatorów oraz instalować zabezpieczenia centralne w każdym biegunie, zgodnie z zasadami przedstawionymi na **rysunku 28**.



Rysunek 28: Przykładowe warianty łączenia baterii akumulatorów oraz ich zabezpieczeń [30]

a) jedna gałąź szeregową; b) jedna gałąź dwuczęściowa z punktem środkowym
c) trzy gałęzie równoległe; d) trzy gałęzie równoległe 2-częściowe z punktem środkowym

Przykład

Dobrać akumulatory o napięciu znamionowym $U_{n \text{ akum}}$ 12 V, oraz ich zabezpieczenia do zasilacza UPS o mocy 400 kVA, zasilającego odbiorniki przy współczynniku mocy $\cos \varphi_z = 0,8$ oraz sprawności zasilacza $\eta = 0,9$. Napięcie odcięcia $U_k = 1,7$ V/ogniwo. Wymagany czas pracy zasilanych odbiorników wynosi 30 minut. Rezystancja wewnętrzna akumulatora $R_w = 2,5$ m Ω .

$$k_x = \frac{U_{n \text{ UPS}}}{U_{n \text{ akum}}} = \frac{400}{12} = 34$$

$$P_{\text{ognwym}} = \frac{S \cdot \cos \varphi_z}{\eta \cdot n \cdot k_x} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,9 \cdot 6 \cdot 34} = 1777,78 \text{ V / ogniwo}$$

Wymagana liczba gałęzi równoległych „x” oraz moc czynna w pojedynczej gałęzi P_{1g} :

na podstawie tabeli 4, $P_{\text{ogn dysp}} = 471,5$ W/ogniwo/ $U_k = 1,7$ V/t = 30 minut

$$x = \frac{P_{og\ wym}}{P_{ogn\ dysp}} = \frac{1777,78}{471,5} \approx 3,78 = 4 \text{ gałęzie}$$

$$P_{1g} = P_{ogn\ dysp} \cdot k_x \cdot n = 471,5 \cdot 34 \cdot 6 = 96186 \text{ W / gał.}$$

Spodziewany prąd obciążenia pojedynczej gałęzi:

$$I_{B1g} = \frac{P_{1g}}{U_{n\ UPS}} = \frac{96186}{400} = 240,5 \text{ A}$$

Spodziewany prąd obciążenia całej baterii akumulatorów:

$$I_{Bc} = 4 \cdot I_{B1g} = 4 \cdot 240,5 = 962 \text{ A}$$

Spodziewane prądy zwarciove:

- zwarcie w pojedynczej gałęzi

$$I_{kg1} = \frac{U_n}{k_x \cdot R_w} = \frac{408}{34 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 4800 \text{ A}$$

- zwarcie obejmujące całą baterie akumulatorów

$$I_{kgc} = \frac{U_n}{(k_x \cdot R_w) / 4} = \frac{408}{(34 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}) / 4} = 19200 \text{ A} = 19,2 \text{ kA}$$

Do zabezpieczenia poszczególnych gałęzi należy przyjąć bezpieczniki topikowe WT1gG250, natomiast do zabezpieczenia głównego bezpieczniki topikowe WTN3gG1000.

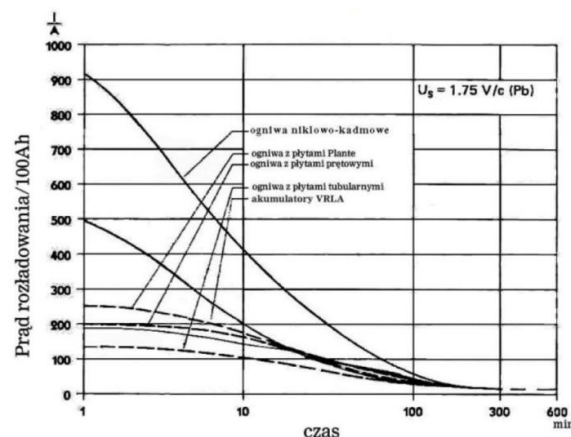
W obydwu przypadkach odporność zwarciova dobieranych bezpieczników jest wystarczająca.

Na **rysunku 29** został przedstawiony wpływ rezystancji akumulatorów różnych typów na wydatek prądowy funkcji czasu rozładowania $I=f(t)$.

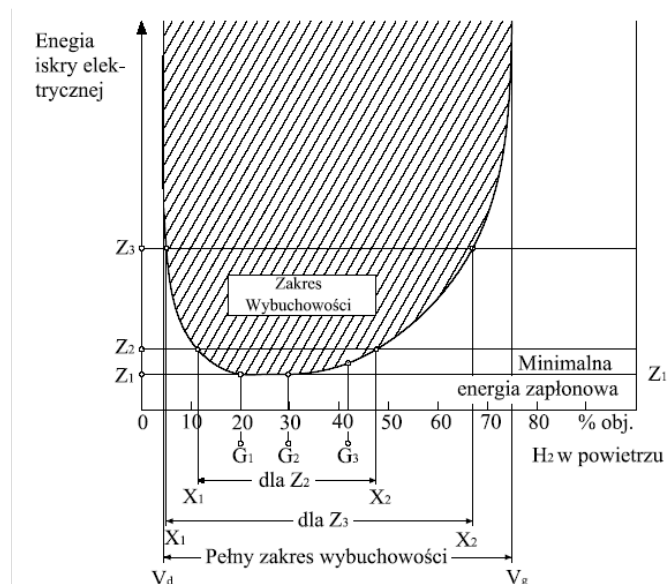
W przypadku zgromadzenia dużej ilości akumulatorów w jednym miejscu jak np. przy zasilaniu oświetlenia awaryjnego z centralnego źródła lub zamknięcia ich w obudowie pozbawionej skutecznej wentylacji, powstaje zagrożenie wybuchowe stwarzane przez mieszanie wodoru z powietrzem. Wydzielany w czasie eksploatacji wodór (H_2) stwarza zagrożenie wybuchowe^{*)} w zakresie stężeń przedstawionych na **rysunku 30**. Zakres wybuchowości mieści się w zakresie (4-75) % H_2 w powietrzu.

Przy stężeniu stechiometrycznym, wynoszącym około 29 % wodoru (H_2) w powietrzu, do wybuchu wystarczy energia o wartości 0,019 mJ.

W celu neutralizacji zagrożeń, która polega na niedopuszczeniu do powstawania stężeń wybuchowych, w praktyce stosuje się wentylację mechaniczną, choć po spełnieniu określonych warunków dopuszcza się wentylację grawitacyjną.



Rysunek 29: Wpływ rezystancji wewnętrznej akumulatorów różnych typów na wydatek prądowy funkcji czasu rozładowania – $I=f(t)$ [25]



Rysunek 30: Zależność energii zapłonowej od składu mieszanin wodoru z powietrzem [27]

Z_1 - minimalna energia zapłonu $E_{\min}=0,019$ mJ,

V_d - dolna granica wybuchowości (DGW)

V_g - górna granica wybuchowości (GGW)

Sterowanie wentylacją mechaniczną przedziału baterijnego należy realizować z wykorzystaniem układów detekcji stężenia wodoru. Układy automatyki powinny mieć ustawione dwa progi wykrywania stężenia wodoru:

- 10% DGW, przekroczenie którego zostanie zasygnalizowane oraz zostanie uruchomiona wentylacja powodująca zwiększenie szybkości wymian powietrza o 100% w stosunku do warunków normalnych,
- 30% DGW, przekroczenie którego spowoduje oprócz dalszego działania sygnalizacji akustyczno-dźwiękowej oraz wentylacji, wyłączenie ładowania baterii akumulatorów do chwili ustania zagrożenia.

Podstawowe wymagania w zakresie wentylacji przedziału baterijnego wynikają bezpośrednio z normy **PN-EN 62040-1:2009 „Systemy bezprzerwowego zasilania (UPS). Część 1. Wymagania ogólne i wymagania dotyczące bezpieczeństwa UPS. Aneks M (normatywny). Wentylacja przedziałów bateryjnych”** [18]. Przybliżoną wartość przepływu zapotrzebowanego powietrza w ciągu godziny w $[m^3/h]$ można obliczyć z poniższego wzoru [18]:

$$Q_p = v \cdot q \cdot s \cdot n \cdot I_g \cdot C_B$$

gdzie:

v – wymagane rozcieńczenie wodoru $(100 - 4)/4 = 24$

q – wytworzony wodór: $0,45 \cdot 10^{-3} [m^3/Ah]$

s – współczynnik bezpieczeństwa

I_g – prąd gazowania o wartości:

1 mA – dla baterii „zamkniętych” (z zaworem VRLA) przy zmiennym napięciu

5 mA – dla baterii otwartych przy zmiennym napięciu

8 mA – dla baterii „zamkniętych” (z zaworem VRLA) przy stałym napięciu ładowania

20 mA – dla baterii otwartych przy stałym napięciu ładowania

n – liczba ogniw baterii, [-]

C_B – pojemność baterii, w [Ah].

Q_p – ilość wymaganego powietrza, w $[m^3/h]$

Przyjmując współczynnik bezpieczeństwa $s = 5$, wzór na obliczenie Q_p może być uproszczony:

- dla baterii akumulatorów klasycznych

$$Q_p = 0,054 \cdot n \cdot I_g \cdot C_B$$

- dla baterii akumulatorów VRLA

$$Q_{VRLA} = 0,25 \cdot Q_p$$

Jeżeli w pomieszczeniu z akumulatorami wolna przestrzeń V spełnia następujący warunek

$$V = V_p - V_u \begin{cases} \geq 2,5 \cdot Q_p \\ \geq 2,5 \cdot Q_{VRLA} \end{cases}$$

gdzie:

V_p – objętość pomieszczenia z akumulatorami, w $[m^3]$

V_u objętość, jaką zajmują akumulatory ze stojakami oraz inne wyposażenie pomieszczenia, w $[m^3]$

to wystarczające jest zastosowanie wentylacji grawitacyjnej, z umieszczonymi po przeciwnych stronach pomieszczenia z otworami: dolotowym i wylotowym.

Każdy z tych otworów musi posiadać powierzchnię nie mniejszą od określonej poniższym wzorem [18]:

$$A_p = 28 \cdot Q_p$$

gdzie:

A_p – suma przekrojów otworów zewnętrznych i wewnętrznych, w $[cm^2]$.

W takim przypadku otwory wentylacyjne należy umieścić na przeciwległych ścianach. Jeżeli jest to niemożliwe i otwory wentylacyjne muszą zostać wykonane na tych samych ścianach to odległość pomiędzy nimi nie może być mniejsza niż 2 m. Ten sam wymóg dotyczy instalowania wentylatorów wyciągowych, których odległość nie może być mniejsza niż 2 m. Podane wymagania mają charakter orientacyjny. Opracowanie projektu wentylacji pomieszczenia baterijnego jest zagadnieniem wymagającym specjalistycznej wiedzy i powinno być opracowane przez uprawnionego projektanta branży sanitarnej. Rola projektanta elektryka ogranicza się do zaprojektowania układu sterowania i zasilania wentylatorów.

Brak skutecznej wentylacji pomieszczeń bateryjnych w praktyce kończy się tragicznie, czego dowodem są zdjęcia z wybuchu pomieszczenia baterijnego.



Foto. 1: Pomieszczenie bateryjne zasilacza UPS po wybuchu wodoru

Kolejnym ważnym problemem z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz pewności zasilania urządzeń przeciwpożarowych, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru jest lokalizacja Rozdzielniczy Głównej Budynku (RGB). Przy podejmowaniu decyzji dotyczącej miejsca instalacji RGB, należy posługiwać się wymaganiami § 209. 3 Rozporządzenia [1]:

Wymagania dotyczące bezpieczeństwa pożarowego budynków oraz części budynków stanowiących odrębne strefy pożarowe, określanych jako PM, odnoszą się również do garaży, hydroforni, kotłowni, węzłów ciepłowniczych, rozdzielni elektrycznych, stacji transformatorowych, central telefonicznych oraz innych o podobnym przeznaczeniu.

Rozdzielnia Główna, w której instalowana będzie RGB powinna stanowić osobną strefę pożarową. Energię elektryczną do RGB należy doprowadzić kablem (zespołem kablowym) o wymaganej odporności ogniowej lub kablem nieposiadającym odporności ogniowej prowadzonym w kanale kablowym wykonanym z materiałów ognioodpornych, gwarantujących podtrzymanie funkcji przez wymagany czas określony w scenariusz rozwoju zdarzeń pożarowych. Jeżeli Rozdzielnia Główna nie stanowi osobnej strefy pożarowej, należy w instalacji budynku wydzielić sekcję ppoż. i zainstalować ją w obudowie spełniającej wymogi dla osobnej strefy pożarowej oraz zasilić przewodem (zespołem kablowym) posiadającym cechę podtrzymania funkcji zgodną z wymaganiami określonymi w scenariuszu zdarzeń pożarowych. Zasilanie urządzeń ppoż. należy realizować sprzed przeciwpożarowego wyłącznika prądu. W takim przypadku zasilanie RGB powinno zostać przerwane wraz zadziałaniem przeciwpożarowego wyłącznika prądu. Na zakończenie należy zwrócić uwagę na problem pożarowego wyłączenia budynku, który przez wiele osób jest źle interpretowany. **Zgodnie z przepisami o ochronie przeciwpożarowej jedyną osobą upoważnioną do uruchomienia przeciwpożarowego wyłącznika prądu a tym samym wyłączenia zasilania płonącego budynku jest dowódca akcji ratowniczo-gaśniczej. Bez jego zgody nie wolno wyłączać zasilania w energię elektryczną płonącego budynku.**

LITERATURA

1. Ustawa o ochronie przeciwpożarowej [tekst jednolity: Dz. U. z 2017 roku poz. 736]
2. Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [Dz. U. z 2015 roku poz.1422].
3. Rozporządzenie Ministra Łączności z 21 kwietnia 1995 roku w sprawie zasilania energią elektryczną obiektów budowlanych łączności [Dz. U. Nr 50/1995 poz. 271].
4. Rozporządzeniu Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie wykazu wyrobów służących zapewnieniu bezpieczeństwa publicznego lub ochronie zdrowia i życia oraz mienia, a także zasad wydawania dopuszczenia tych wyrobów do użytkowania [Dz. U. 2007 nr 143 poz. 1002 z późniejszymi zmianami].
5. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010, w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków innych obiektów i terenów [Dz. U. Nr 109/2010 poz. 719].
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 roku, w sprawie sposobu deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych oraz sposobu znakowania ich znakiem budowlanym Dz. U. z 2016 roku poz. 1966].
7. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 24 lipca 2009 roku w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych [Dz. U. Nr 124/2009 poz. 1030].
8. **PN-EN 12101-10:2007** Systemy kontroli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła – część 10: Zasilanie.
9. **PN-IEC 60364-5-56:1999** Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Instalacje bezpieczeństwa.
10. **PN-HD 60364-5-56:2013** Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Instalacje bezpieczeństwa.
11. **PN-EN 54-4: 2002** Systemy sygnalizacji pożarowej. Część 4: Zasilacze.
12. **PN-EN 12101-10: 2007** Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła. Część 10: Zasilacze.
13. **N SEP-E 005** Dobór przewodów elektrycznych do zasilania urządzeń, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie pożaru.
14. **PN-EN 1363-2:2001** Badanie odporności ogniowej. Część 2: Procedury alternatywne i dodatkowe.
15. **PN-HD 60364-4-41:2009** Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 4-41. Instalacje dla zapewnienia bezpieczeństwa Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
16. **PN-EN 50160:2010** Parametry jakościowe napięcia w publicznych sieciach rozdzielczych.
17. **ISO8528-5** Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądotwórcze.
18. **PN-EN 62040-1:2009** Systemy bezprzerwowego zasilania (UPS). Część 1. Wymagania ogólne i wymagania dotyczące bezpieczeństwa UPS. Aneks M (normatywny). Wentylacja przedziałów bateryjnych.
19. **PN-EN 60896-21: 2007** Baterie ołowiowe stacjonarne. Część 21.: Typy wyposażone w zawory. Metody badań.
20. **PN-EN 60896-11:2007** Baterie ołowiowe stacjonarne. Część 11. Ogólne wymagania i metody badań.
21. M. T. Sarniak - Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych – Grupa Medium Warszawa 2015 – wydanie I
22. J. Wiatr; M. Orzechowski – Przeciwpowozarowy wyłącznik prądu. Mity a rzeczywistość. - elektro.info nr 1-2/2017 –cz. 1; elektro.info nr 3/2017 – cz. -2.
23. R. Lenartowicz, J. Fangrat –Instalacje zasilające urządzenia bezpieczeństwa powozarowego – ITB Warszawa 2016
24. J. Wiatr; M. Orzechowski – Instalacje elektryczne do zasilania urządzeń elektrycznych, których funkcjonowanie jest niezbędne w czasie powozaru – Grupa Medium 2016 – wydanie I.
25. Z. Łęgosh – Potrzeby własne w elektroenergetyce - OPBEE – materiał konferencyjne, Szklarska Poręba 11-13 grudnia 2011
26. Poradnik projektanta Systemów Sygnalizacji Powozaru – cz. II – SITP Warszawa 2009
27. J. Wiatr, M. Orzechowski – Poradnik Projektanta Elektryka – Grupa Medium Warszawa 2012, wydanie V

28. J. Wiatr, A. Boczkowski, M. Orzechowski –Ochrona przeciwporażeniowa oraz dobór przewodów i ich zabezpieczeń w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia – DW MEDIUM Warszawa 2010 - wydanie I
29. J. Wiatr – Podstawy projektowania przydomowych elektrowni fotowoltaicznych – Grupa Medium 2017 – wydanie I.
30. T. Sutkowski – Rezerwowe i bezprzerwowe zasilanie w energię elektryczną. Urządzenia i układy. – COSiW SEP 2007
31. P. Tofiło – konspekt do wykładu dla studentów SGSP – r. a. 2012/2013
32. www.fizyka.wip.pcz.pl – 16.07.2017
33. www.aval.com.pl -19.07.2017
34. Karta katalogowa akumulatora EPL 210-12 – www.aval.com.pl - 28.07.2017