

Akademia Inżynierska w Polsce
Academy of Engineering in Poland

AIP **SEP** 

Zagrożenia pożarowe w instalacjach i sieciach elektroenergetycznych w świetle badań naukowych i doświadczeń Szkoły Głównej Służby Pożarniczej

st. kpt. dr inż. Szymon PTAK
Kierownik Katedry Techniki Pożarniczej, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

Webinarium Akademii Inżynierskiej w Polsce
27.X.2021 r.

Zakres prezentacji

- Wyniki badania przyczyn pożarów urządzeń i instalacji elektrycznych
- Wyzwania dotyczące instalacji fotowoltaicznych
- Elektromobilność – pojazdy elektryczne
- Pożary ogniw wtórnych (w tym baterii trakcyjnych)



Badanie przyczyny pożaru

Przyczyny pożarów

- Łuk elektryczny
- Nieprawidłowy dobór urządzeń / wada fabryczna
- Rezystancja zestykowa
- Brak kontroli / badań okresowych instalacji elektrycznych
- Montaż urządzeń (żarówka, inwerter) w pobliżu materiałów palnych
- Wydzielanie wodoru z akumulatorów kwasowo-ołowiowych
- Wyższe harmoniczne
- Zagrożenia od ogniw wtórnych

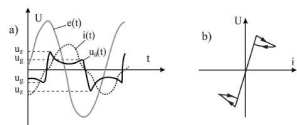
Łuk elektryczny jako przyczyna pożaru

• Przyczyna zagrożenia:

- Wysoka temperatura
- Wybuch łuku elektrycznego (ang. *electric arc flash*)
- Promieniowanie UV
- Brak detekcji przez standardowe zabezpieczenia

• Prewencja:

- Łuk w obwodach AC i DC – przejścia przez „zero”
- Wykrywanie promieniowania UV i zwarcie (np. szynoprzewodów)
- Wykrywanie charakterystyk dynamicznych łuku AC

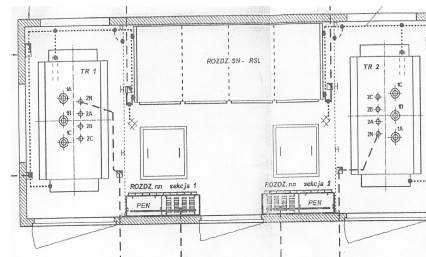


Rys. 7.4. Prąd i napięcie łuku w obwodzie prądu sinusoidalnego: a) przebiegi w obwodzie o charakterze indukcyjnym; b) charakterystyka dynamiczna łuku prądu sinusoidalnego



Łuk elektryczny – przykład nr 1

- Pożar stacji transformatorowej 15 / 0,4 kV.
- Dwa transformatory olejowe, 2 x 630 kVA
- Rozdzielnia SN, dwie rozdzielnie nN.

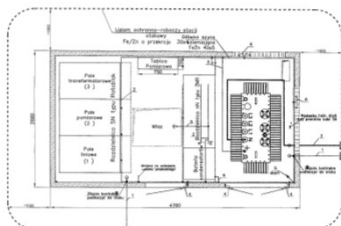


- Wykluczono stan awaryjny po stronie SN – powstanie łuku po stronie nN byłoby niemożliwe
- Zapalenie izolacji, rozprzestrzenianie pożaru kanałem kablowym do stacji SN
- Łuk zapalił się pomiędzy szynoprzewodem a stalową obudową
- Odstępy izolacyjne, kondensacja pary wodnej, część przewodząca obca, przepięcie?



Łuk elektryczny – przykład nr 2

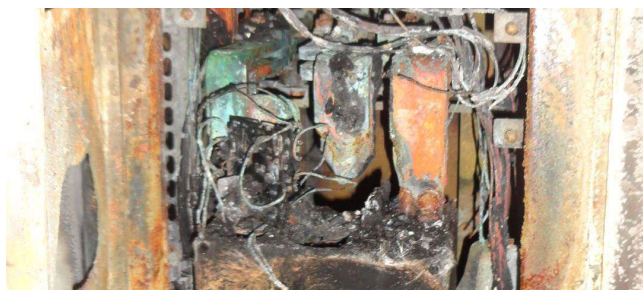
- Pożar stacji transformatorowej 15 / 0,4 kV.
- Jeden transformator olejowy, 630 kVA
- Rozdzielnia SN, dwie rozdzielnie nN, bateria kondensatorów.



- Największe uszkodzenie (wzrost temperatury, nagrzewanie cieplne) kondensatorów

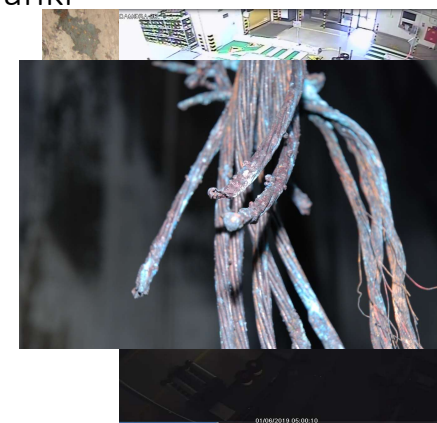


- Łuk zapalił się pomiędzy szynoprzewodami a stalowymi drzwiami rozdzielnic
- Wykorzystanie transformatora po odbudowie



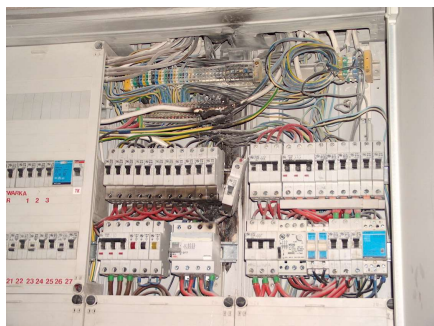
Łuk elektryczny – przesłanki

- Punktowe wypalenia
- Wpływ na pracę urządzeń, np. oświetleniowych
- Stopiony przewodnik – charakterystyczny ślad

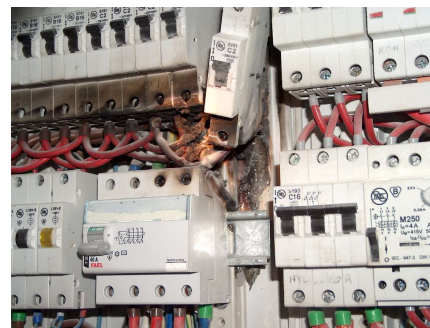


Rezystancja zestykowa w obwodzie nN

- Pożar w obrębie tablicy rozdzielczej, spowodowany przez RCD, 40 A, 30 mA.
- Zniszczeniu uległy wyłączniki instalacyjne i okablowanie
- **Szybka reakcja pracowników (waga szkolenia!)**
- RCD wymienione 3 dni wcześniej

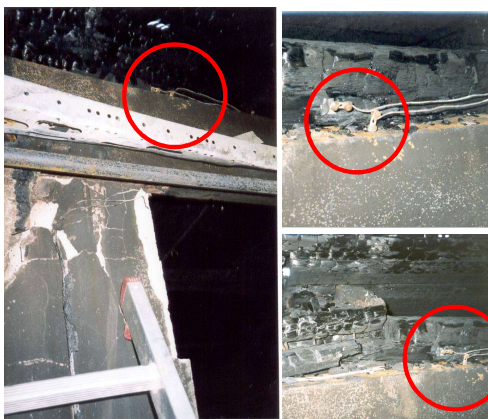


Lokalizacja przyczyny



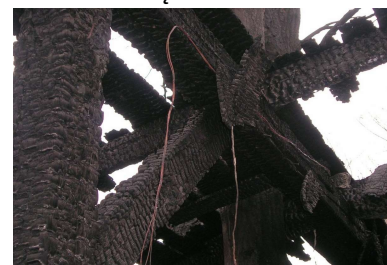
Rezystancja zestykowa w obwodzie nN

- Pożar dachu o konstrukcji drewnianej
- Łącznik (?) zlokalizowany w pobliżu belki stropowej
- **Prawdopodobnie nielegalne przyłącze w domu jednorodzinnym**
- Rezystancja zestykowa doprowadziła do zapłonu belki stropowej



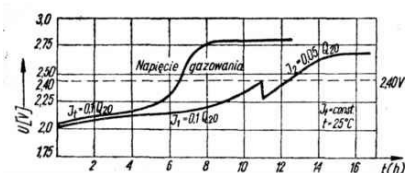
Materiał palny a źródło ciepła

- Tego typu sytuacje ciągle się zdarzają
- Montaż na podłożu palnym
- „Tymczasowe” rozwiązania



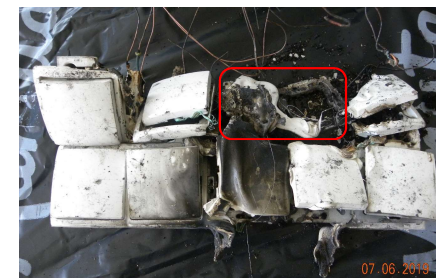
Gazowanie akumulatorów kwasowo- ołowiowych

- Stosowanie *inteligentnych* ładowarek
- Gromadzenie wodoru w przestrzeni podstropowej
- Źródło zapłonu?

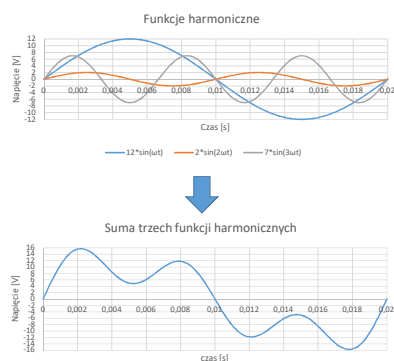


Błąd projektowy czy wada fabryczna?

- Pożar w zakładzie produkcyjnym
- 10 (2x5) wyłączników w rzędach
- Włłączniki: 10 A / 250 V
- Zabezpieczenie obwodu: C16
- Jaka będzie reakcja zabezpieczeń przy prądach 10-16 A?
- Na ujęciach z CCTV widoczne błyskanie światła
- Prawdopodobnie powstał łuk w torze prądowym wyłącznika



Wyższe harmoniczne – szeregi Fouriera



- Analiza jakości energii elektrycznej:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

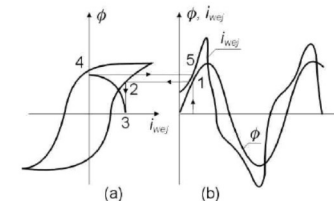
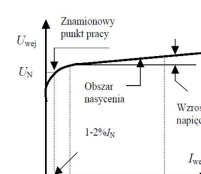
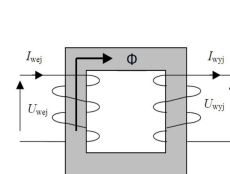
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$



Przyczyny powstawania wyższych harmonicznych - nieliniowość

- Wyładowcze źródła światła
- Łuk elektryczny (np. piece łukowe, spawarki łukowe)
- Transformatory – nieliniowa ch-ka magnesowania rdzenia



Wpływ wyższych harmonicznych na obciążalność transformatora

$$\Delta p_{obc} = \Delta p_{Cu} + K \cdot \Delta p_{d,sin}$$

Tabela 1. Wyniki analizy widmowej przebiegu prądowego dla odbiornika nieliniowego

n_i	1	3	5	7	9	11	13	15
I_i/I_1	0,547	0,532	0,444	0,339	0,224	0,13	0,059	-

$$K = \sum_{i=1}^n n_i^2 \cdot h_i^2 = 20,1 \approx 20$$

Zał. Straty dodatkowe jako 10% strat podstawowych:

$$K_S = \frac{\Delta p_{Cu} + \Delta p_{d,sin}}{\Delta p_{Cu} + K \cdot \Delta p_{d,sin}} = \frac{1+0,1}{1+20 \cdot 0,1} = 0,60$$

Kuśmirek Z., Współczynnik obciążenia transformatora zasilającego odbiorniki nieliniowe i jego pomiar, Przegląd Elektrotechniczny 6/2004, s. 636 – 638.

Wnioski

- Zbyt duża zawartość składowych harmonicznych może doprowadzić do przegrzewania transformatora **nawet w warunkach parametrów znamionowych jego pracy!**
- Zdarzenie pożarowe to zwykle koincydencja wielu czynników
- Największym zagrożeniem jest zwykle „czynniki ludzki”



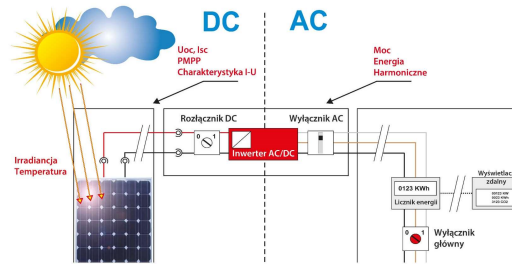
Instalacje fotowoltaiczne

Rynek instalacji PV w Polsce (2020-21)

- Moc zainstalowana: ok. 5,63 GW (lipiec 2021 r.)
- Przyrost rzędu 110% (rok do roku)
- Tylko w sierpniu 2021 r. powstało ok. 33 tys. instalacji
- Głównie instalacje *mikro* (prosumenckie)
- Całkowita moc zainstalowana w KSE (2020): 49,2 GW
- Obroty na rynku: > 9 mld zł (wg szacunków IEO)

Elementy składowe typowej instalacji

- Ogniwa fotowoltaiczne -> moduły -> panel
- Dedykowane przewody
- Zabezpieczenia (po stronie DC i AC)
- Inwerter
- Licznik energii elektrycznej (dwukierunkowy)
- Ogniwa wtórne ze osprzętem (regulator ładowania) – *tylko off-grid i mieszane*



Pozostałe elementy

- Licznik energii elektrycznej
- Wyłącznik główny
- Przeciwpowozarowy wyłącznik prądu
- Osprzęt dodatkowy (np. analizatory, wyświetlacze, itp.)



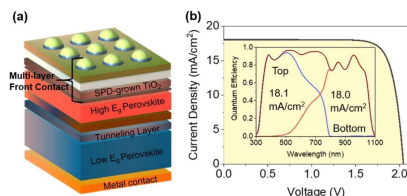
Kierunek rozwoju

Sprawność ogniw

- Sprawność zależy od technologii:
 - Dla ogniw monokrystalicznych: ok. 26-27%
 - Dla ogniw polikrystalicznych: ok. 23-24%
 - Dla ogniw wielowarstwowych: ok. 47%
 - Dla ogniw **perowskitowych**: ok. 21-22% *

Perowskity – kierunek rozwoju rynku

- Perowskity to grupa minerałów, np. tytanian(IV) wapnia, CaTiO_3
- Przełomowa praca Olgi Malinkiewicz w 2014 r.
- Opracowana metoda wytwarzania ogniw jest nadzieją fotowoltaiki (niskie koszty, powszechność, technologia umożliwiająca szerokie zastosowania)
- Trwają prace nad obniżeniem kosztów, polepszeniem sprawności.



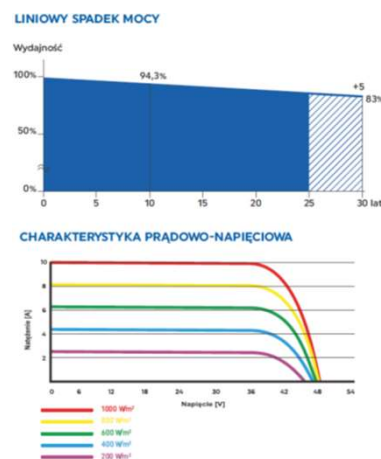
Jaka barwę ma przyszłość?



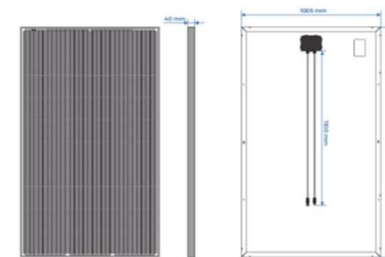
30

Znaczenie charakterystyki ogniwa

- Określenie prądu zwarcia
- Określenie napięcia otwartego obwodu
- Wyznaczenie punktu maksymalnej mocy
- Zależność mocy rzeczywistej ogniwa od warunków nasłonecznienia
- **Zagrożenie porażeniowe dla ekip ratunkowych!**



Przykładowe parametry typowego modułu PV



PARAMETRY ELEKTRYCZNE STC		400
Moc znamionowa [Wp]		400
Prąd zwarcia [A]		10,31
Napięcie jałowe [V]		48,75
Prąd maksymalny [A]		9,81
Napięcie maksymalne [V]		40,86
Wydajność [%]		20,02

Czy możliwe jest wyłączenie instalacji PV?



Sedno problemu zagrożenia porażeniem strażaków podczas działań

Stan prawny i normalizacja - problemy

- Kryterium rynkowe to kryterium najniższej ceny
- Niejasne definicje, np. „dokumentacja techniczna”
- Istnieją normy (DIN VdE, NFPA) - nieobligatoryjne
- **Niski poziom wymagań dot. zabezpieczeń**
- Uzgodnienie instalacji PV – kryterium mocy (6,5 kW)
- Czy instalacja PV to urządzenie? Co z przeglądami?
- Kwestie bezpieczeństwa działań



Przykłady zdarzeń, statystyki

Przykłady zdarzeń w Polsce

- 2019 – zwarcie w **inwerterze** i pożar kotłowni – budynek prywatny
- 2019 – pożar puszki rozdzielczej – farma PV
- 2019 – pożar **inwertera** w kotłowni – budynek prywatny
- 2019 – pożar **inwertera** na dachu sklepu wielkopowierzchniowego
- 2020 – pożar poddasza, na dachu instalacja PV (czynnik zewn.)
- 2020 – pożar trawy w obrębie farmy PV
- 2020 – pożar instalacji (od punktu łączeniowego?)
- 2020 – pożar **inwertera** – budynek prywatny (garaż)
- 2020 – pożar **inwertera** – urząd gminy
- 2020 – pożar w obrębie farmy PV (czynnik zewn.)
- 2020 – pożar baterii żelowych (uliczna instalacja PV)
- 2020 – pożar **tablicy rozdzielczej** instalacji PV – budynek prywatny (kotłownia)

Przykłady zdarzeń w Polsce

- 2020 – zwarcie po stronie DC i pożar budynku gospodarczego
- 2020 – pożar przewodów PV (przyczyna nieznana, inwerter sprawny)
- 2020 – pożar modułu PV na dachu (przekrycie z materiałów palnych)
- 2020 – pożar przewodów w ciągu kablowym pod elewacją – budynek prywatny
- 2021 – pożar **tablicy rozdzielczej** w placówce oświatowej
- 2021 – pożar **tablicy rozdzielczej** – budynek prywatny (garaż)
- 2021 – Alarm fałszywy z instalacji wykrywania przy montażu instalacji
- 2021 – Pożar **tablicy rozdzielczej**, działania w obronie, odłączenie części AC instalacji PV
- 2021 – *Kolizja drogowa dwóch pojazdów, jeden przewoził moduły PV - brak pożaru*

Statystyki niemieckie

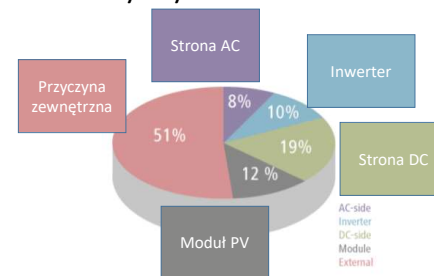


Figure 1: Error source – allocation for Germany (data from Sepanski et. al. 2015)



Figure 2: Type of error – allocation for Germany (data from Sepanski et. al. 2015)

Zdarzenia do 2013 r., 430 pożarów (210 spowodowanych przez instalacje PV) / 1,3 mln instalacji (0,016%)

Statystyki brytyjskie

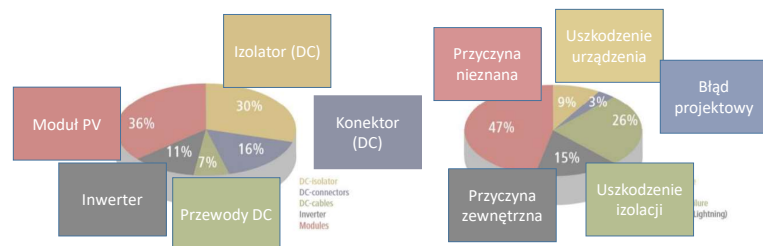


Figure 3: Error source – allocation for the UK (data from BRE 2017a)

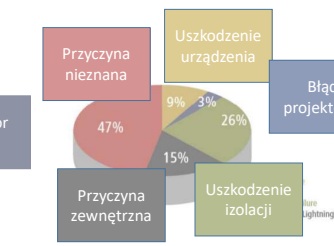


Figure 4: Type of error – allocation the UK (data from BRE 2017a)

Lata 2010-2018, 58 zdarzeń / 1 mln instalacji (0,0058%)

Wnioski

- Statystycznie PSP ma do czynienia z pożarem, który **objął** instalację PV, nie pożarem wywołanym przez instalację PV
- Obecnie urządzenia są nowe – czy spodziewać się znacznej liczby zdarzeń w przyszłości?
- Ryzyko porażenia podczas zdarzeń jest niezerowe – wpływ na taktykę działań ratowniczych
- Niskie wymagania przepisów – stymulator rozwoju rynku vs. Wpływ na bezpieczeństwo
- Przykłady zagrożeń – dalsza część prezentacji

Typowe zagrożenia



Typowe zagrożenia

- łuk elektryczny prądu stałego
- Porażenie
- Produkty spalania
- pożar instalacji wywołany przez jej element
- błędy monterskie jako przyczyna pożaru / awarii
- hot-spot, zacinienie modułu
- panel fotowoltaiczny jako elewacja budynku

Łuk elektryczny w obwodzie DC

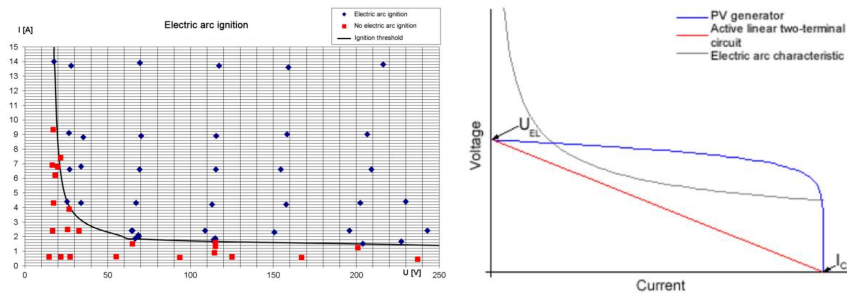


DC Solar Array - Arc fault demonstration, AC Solar Warehouse (YT)

Istota zagrożenia od łuku elektrycznego

- Temperatura $> 10\,000\text{ K}$
- Silne promieniowanie UV
- Niezerowe ryzyko porażenia łukiem elektrycznym
- W instalacji PV łuk może powstawać szeregowo i równoległe, zależnie od szczegółowych warunków awarii / uszkodzenia / pożaru

Powstawanie łuku elektrycznego w obwodach DC



Palność ogniwa

Czy ogniwo PV jest palne?

- Większość masy stanowi metalowa rama oraz nieorganiczna struktura ogniwa (półprzewodniki)
- Ogniwo zawiera palne polimery: izolację przewodów, folię zabezpieczającą, skrzynkę przyłączeniową.
- Zazwyczaj ogniwo gaśnie po oddzieleniu od źródła ciepła, nie wpływając istotnie na rozprzestrzenianie się pożaru, ALE:
 - Zależy to od mocy pożaru
 - Zależy to od dostępności tlenu (np. efekt kominowy)

Czy ogniwo PV jest palne?



Moc palnika: 25 kW



Moc palnika: 150 kW

Produkty spalania

- Stałe: głównie sadza
- Ciekłe: zanieczyszczenia wody gaśniczej, wody deszczowej
- Gazowe: toksyczne substancje

Miejsca połączeń elementów instalacji



Typowe błędy monterskie / projektowe

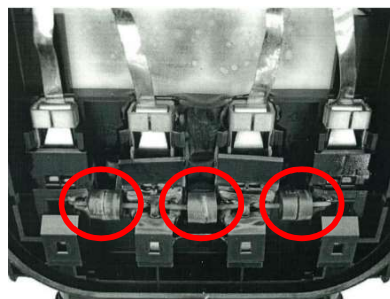
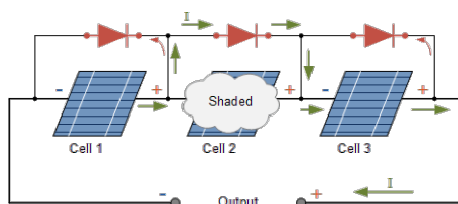
- Nieprawidłowo zrobione przewody
- Konektory od różnych producentów
- Brak zabezpieczenia przewodów – możliwość przetarcia
- Niewłaściwe warunki chłodzenia inwertera

Inwerter – podłoże palne



Nierównomierne oświetlenie ogniwa

- Powstawanie tzw. gorących punktów
- Niwelacja zagrożenia przez tzw. diody by-pass
- Znaczna dyssypacja ciepła przez diody!



Wieloaspektowe spojrzenie na instalacje PV

- Ryzyko pożaru:
 - PV jako źródło
 - Zewnętrzna przyczyna pożaru
- Ryzyko projektowe
 - Błędy projektowe
 - Błędy monterskie
 - Wady fabryczne sprzętu
- Ryzyka podczas działań ratowniczych:
 - Porażenie
 - Zatrucie
 - Zanieczyszczenie środowiska
 - Utrudniony dostęp do budynku

Rozwiązania poprawiające bezpieczeństwo

- Optymalizatory mocy
- Zwieranie ogni w razie awarii
- Mikroinwertery?
- Produkty renomowane a zamienniki
- Prawidłowe chłodzenie
- Wykwalifikowana kadra monterska
- Opracowanie wytycznych do projektowania
- Monitorowanie istniejących instalacji



Elektromobilność

Problemy straży pożarnej

- Różne systemy dezaktywacji pojazdu
- Różna konstrukcja, lokalizacja baterii trakcyjnej
- Dynamika pożaru
- Przyszłość?

Chevrolet – przykładowe rozwiązania

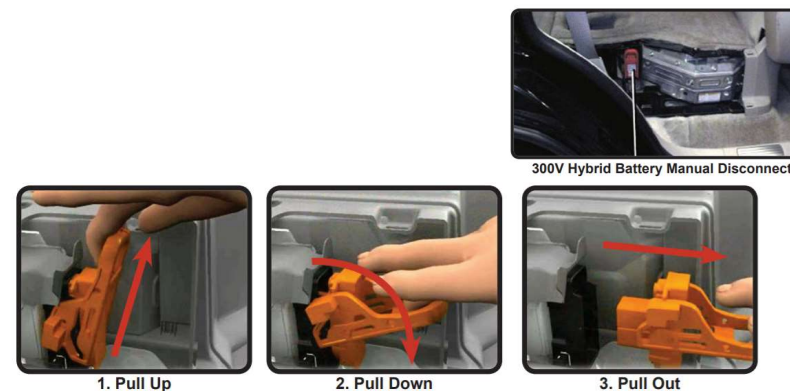
- Przy bezpiecznikach może znajdować się przewód 12V (np. w skrytce w bagażniku) przeznaczony do przecięcia przez ratowników
- UWAGA: poduszki powietrzne będą bezpieczne po min. 1 min (energia zgromadzona w obwodzie)
- Zakaz cięcia pomarańczowych przewodów! (360 V DC)
- Baterie zainstalowane w tunelu/ pod tylnymi siedzeniami



Unieruchomienie pojazdu elektrycznego



Skomplikowane mechanizmy – GMC Yukon



Pożar pojazdu (Tesla)

Baterie litowo-jonowe:

- Zawierają rozpuszczalniki organiczne (palne)
- Inne palne produkty spalania + tlen
- Znaczna ilość energii zgmagazynowana – dynamika zjawiska



OSP Boguszów

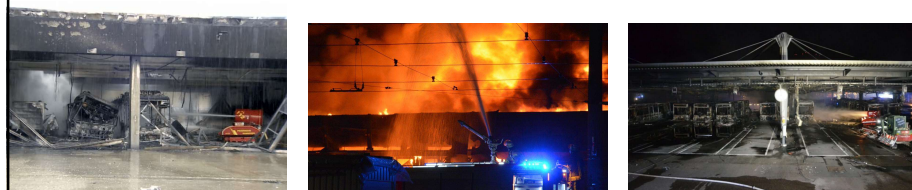


Ekologia, pojazdy elektryczne, bezpieczeństwo

- Wydobycie i przetwórstwo litu, kobaltu, manganu, produkcja baterii trakcyjnej – emisja CO₂
- 10 lat przy przebiegu rocznym 15 000 km, z uwzględnieniem emisji CO₂ przy ładowaniu baterii, 156-180 g / km
- Porównano Teslę 3 do Mercedesa z napędem diesla z tego samego segmentu
- Użytkowanie aut elektrycznych, przy aktualnej technologii produkcji, to 11-28% więcej emisji CO₂ niż przy użytkowaniu silników diesla.
- Źródło: Christoph Buchal, Hans-Dieter Karl und Hans-Werner Sinn, *Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?*, ifo Schnelldienst 8/2019, 40-54

Pojazdy elektryczne wycofywane z użytkowania

- Pożar 8 autobusów elektrycznych i stacji ładowania w Hanowerze (czerwiec 2021)
- Pożar 38 autobusów elektrycznych w Duesseldorfie (kwiecień 2021)
- Pożar 25 autobusów elektrycznych w Stuttgarcie (październik 2021)





Zagrożenia od ogniw wtórnych

Baterie trakcyjne

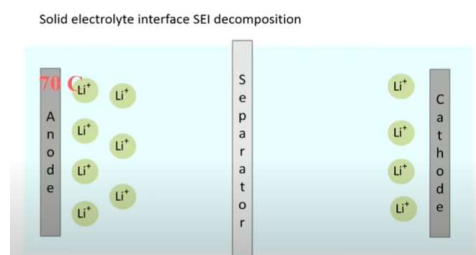
- Możliwość wydzielania się szkodliwych oparów
- Konieczność wentylacji
- Możliwość zwarcia i przegrzania – pożaru baterii
- Możliwość wycieku płynu (może być korodujący, toksyczny, palny)
- Bateria zwykle będzie miała zgromadzoną energię (nie będzie w pełni rozładowana – uszkodzenie!)
- Bateria w pojeździe może zapalić się ze znacznym opóźnieniem po zdarzeniu – monitoring, np. termowizja
- Jeżeli gaszenie baterii jest konieczne – wymagane są bardzo duże wydajności prądu wody (tylko chłodzenie-penetracja do wewnątrz obudowy zwykle niemożliwa)
- Bateria może być chłodzona cieczą, można pomylić z elektrolitem (wyciek)



Zjawisko „thermal runaway” – rozbieg termiczny

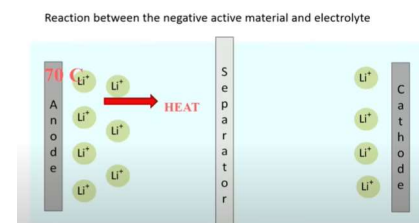
Źródło (youtube): Opening and A strategy for fighting lithium-ion battery fires - Marko Hassinen

1. Rozkład termiczny na interfejsie elektroda-elektrolit (70°C)



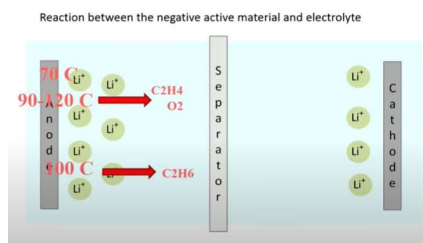
Zjawisko „thermal runaway” – rozbieg termiczny

2. Wydzielanie ciepła (reakcja egzotermiczna)



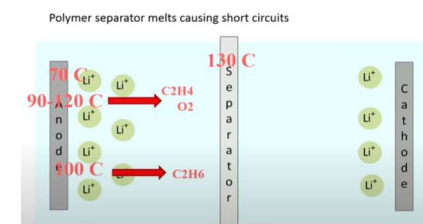
Zjawisko „thermal runaway” – *rozbieg* termiczny

3. Dalszy rozkład termiczny i wydzielanie palnych gazów (90-120°C)



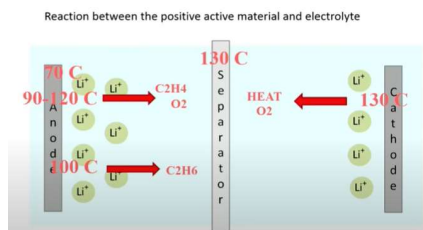
Zjawisko „thermal runaway” – *rozbieg* termiczny

4. Rozkład separatora (tworzywo sztuczne) (130°C)



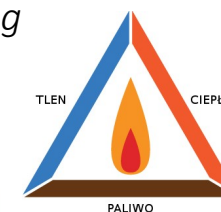
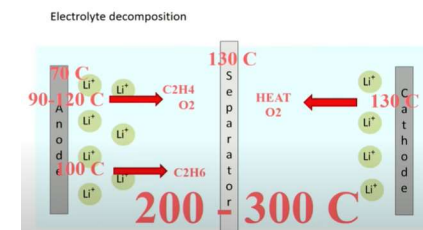
Zjawisko „thermal runaway” – *rozbieg* termiczny

5. Reakcja elektrody (katoda) – elektrolit, wydzielanie ciepła i O_2 (130°C)



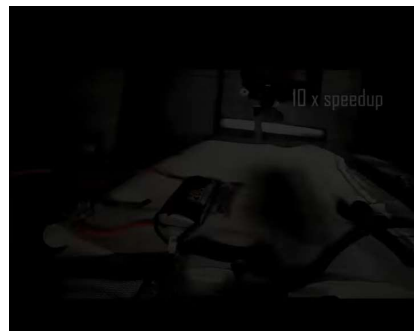
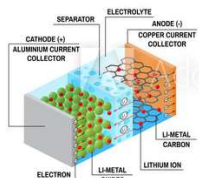
Zjawisko „thermal runaway” – *rozbieg* termiczny

7. Rozkład termiczny elektrolitu (200-300°C)



Ogniwa wtórne Li-Ion

- ang. *thermal runaway* ok. 70°C
- Rozkład termiczny na styku anody i elektrolitu
 - Etanol @ 90-120°C
 - Etan @ 100°C
- Rozkład polimerowego separatora elektrod @ 130°C
- Ciepło i tlen na katodzie @ 130°C
- Rozkład elektrolitu @ 200-300°C
- BMS może zapobiegać zwarceniu



Problem skali

- Pojemność: 2 MWh
- Finlandia
- Instalacja gaśnicza N₂, osprzęt w oddzielnym kontenerze



Dziękuję za uwagę

st. kpt. dr inż. Szymon Ptak

sptak@sgsp.edu.pl