Wybrane przyczyny pożarów instalacji i urządzeń elektrycznych – studium przypadku

Szymon PTAK, Akademia Pożarnicza w Warszawie, sptak@apoz.edu.pl, +48 22 56 17 699

Streszczenie

Popularność i powszechność wykorzystania energii elektrycznej wynika w dużej mierze z możliwości jej konwersji do innych rodzajów energii lub ciepła. Jeżeli energia wydzieli się w miejscu do tego nie przeznaczonym, w przypadku braku skutecznych zabezpieczeń technicznych i nierzadko także organizacyjnych, może dojść do awarii lub pożaru. Przez całe dekady rozwoju techniki inżynierowie niestrudzenie pracowali nad powszechnością i niezawodnością rozwiązań technicznych w zakresie zabezpieczeń instalacji elektrycznych. Wpływali na standaryzację techniki, za czym w parze idzie jakość i bezpieczeństwo użytkowania instalacji i urządzeń elektrycznych. Wreszcie, kształtowali przepisy prawa i kształcili kolejne pokolenia swoich następców. Pomimo tych niestrudzonych wysiłków wyrugowanie ryzyka pożaru z obszaru elektrotechniki jest niemożliwe. Jak pokazuje praktyka w zakresie badania przyczyn pożarów, zdarzają się usterki techniczne prowadzące do pożaru, zdarzają się także błędy organizacyjne, czy błędy ludzkie. Niestety, ta ostatnia kategoria jest ciągle wymagającym przeciwnikiem w walce o bezpieczeństwo pożarowe związane z użytkowaniem energii elektrycznej.

1. Wprowadzenie

1.1. Użytkowanie energii elektrycznej

Od XIX w. elektryfikacja przemysłu, miast i wsi nabierała tempa. Ostatecznie energia elektryczna „trafiła” pod strzechy w najdalsze zakątki globu. Trudno w dzisiejszych czasach wyobrazić sobie funkcjonowanie społeczeństwa pozbawionego dostępu do energii elektrycznej. Dlaczego jednak energia elektryczna ma tak ogromne znaczenie? Istnieje kilka czynników, które wpłynęły na powszechność jej wykorzystania. Energia elektryczna może być w dość łatwy i efektywny sposób transformowana do innych form energii. Silnik elektryczny zamienia energię elektryczną, za pośrednictwem energii pola magnetycznego i ogółem zjawisk magnetycznych, w energię mechaniczną ruchu obrotowego wirnika, co pozwala na realizację napędu pojazdu, maszyny czy pompy. Energię elektryczną w łatwy sposób zamienić można na ciepło i zaspokajać potrzeby użytkowników w zakresie ogrzewania budynków, czy przygotowywania potraw. W obydwóch przypadkach wykorzystuje się albo bezpośrednie, rezystancyjne wydzielanie energii lub zjawiska elektromagnetyczne, obejmując dział elektrotermii związany z nagrzewaniem indukcyjnym.

Energię elektryczną można w stosunkowo łatwy sposób transformować: do wysokich / najwyższych napięć w celu realizacji przesyłu energii na duże odległości, czy też do niskiego napięcia w celu realizacji zasilania w energię elektryczną budynków. Tradycyjnie dokonuje się

tego wykorzystując transformatory. W istocie właśnie ta możliwość sprawiła, że ostateczną batalię prowadzoną przez N. Teslę i T. Edisona wygrał genialny serbski wynalazca i obwody prądu przemiennego rozpowszechniły się na cały świat. Należy jednak dodać, że postęp w dziedzinie energoelektroniki, szczególnie w zakresie półprzewodnikowych przekształtników energii, dał człowiekowi nowy, szeroki wachlarz możliwości zamiany napięcia stałego na przemienne. Czy uprawnionym byłby zatem wniosek, że gdyby w czasach Tesli i Edisona istniałyby tego typu rozwiązania technologiczne, czy sieci prądu stałego nie wyparłyby projektów powszechniej elektryfikacji za pomocą techniki prądu przemiennego?

Użytkowanie energii elektrycznej wiąże się jednak również z zagrożeniami. Czym wyższe napięcie, tym porażenie człowieka możliwe jest z większej odległości. Wartości napięć w domowej sieci niskiego napięcia są z tego punktu widzenia pewnym kompromisem. Z jednej strony pozwalają na korzystanie z kilku-kilowatowych odbiorników przy relatywnie niskim prądzie, z drugiej strony porażenie jest możliwe w zasadzie przy bezpośrednim dotknięciu elementu pod napięciem.

Pożar jest innym, istotnym zagrożeniem. Niezmiennie od lat różne statystyki pozwalają sądzić, że pomiędzy 20 a 30% pożarów ma swoją przyczynę w instalacjach i/lub urządzeniach elektrycznych. Wynika to przede wszystkim z prawa Joule'a-Lenza, które podaje prostą zależność: $Q=I^2Rt$. Ciepło wydziela się w czasie t na rezystancji R elementów obwodu proporcjonalnie od tej rezystancji oraz do kwadratu przepływającego prądu I. Od tej reguły nie ma wyjątków, zatem każda instalacja i urządzenie podlegać będzie procesom jednokierunkowej wymiany ciepła do otoczenia, jeżeli tylko popłynie prąd elektryczny. Ciepło nie będzie się wydzielać, jeżeli rezystancja będzie zerowa, co jest możliwe tylko w temperaturze zera absolutnego, gdzie zjawisko oporu elektrycznego zanika. W tym znaczeniu nadprzewodnictwo także nie jest wyjątkiem od prawa Joule'a-Lenza, a raczej konsekwencją wstawienia do równania wartości R=0.

Pomiędzy zjawiskami elektrycznymi i mechaniką płynów zachodzi wiele analogii, z których można korzystać wyjaśniając zjawiska elektryczne. Zjawiska elektryczne nie są dla człowieka intuicyjne w takim stopniu jak zjawiska związane z przepływem cieczy, co wynika z braku możliwości biorecepcji pola elektrycznego (jak np. rekiny) czy pola magnetycznego (jak np. gołębie czy krowy). Jeżeli jednak postawić pytanie, czy wraz ze wzrostem średnicy rury wodociągowej (przy tym samym ciśnieniu) przez rurociąg popłynie więcej czy mniej wody, odpowiedź będzie oczywista. Podobnie w zakresie zjawisk elektrycznych: przewód napowietrzny o polu przekroju poprzecznego np. 840 mm^2 będzie w oczywisty sposób zdolny do przesyłu znacznie większego prądu, niż przewód instalacji domowej o polu przekroju poprzecznego rzędu 2,5 mm^2. Jeżeli jednak przepływający prąd będzie wyższy niż dopuszczalny, warunki chłodzenia przewodu okażą się niewystarczające. Jeżeli wydzielone na rezystancji przewodu ciepło nie będzie mogło być skutecznie odprowadzone do otoczenia, temperatura żyły przewodu, a także powłoki izolacyjnej i izolacji będzie rosła. Tutaj oczywiste już staje się zagrożenie polegające na możliwości zniszczenia przewodu czy nawet doprowadzenia do pożaru. W nomenklaturze elektrotechnicznej chodzi tutaj oczywiście o zjawisko przeciążenia i zwarcia.

Powstanie przerwy w obciążonym obwodzie elektrycznym jest jednym z podstawowych mechanizmów powstawania łuku elektrycznego. Łuk elektryczny to przepływ prądu przez zjonizowane powietrze, które w warunkach traci swoje właściwości dielektryczne.

Wytworzenie kanału plazmowego w powietrzu wiąże się nierozerwalnie z powstaniem obszaru ekstremalnie wysokiej temperatury, sięgającej co najmniej tysięcy stopni Celsjusza. Temperatura ta zależy od warunków wytworzenia łuku elektrycznego, niemniej moc wydzielana przez łuk elektryczny jest znacząca. Łuk elektryczny wykorzystywany jest w metalurgii (piece łukowe do topienia metali), spawalnictwie, jest w zasadzie tym samym zjawiskiem co przepływ prądu przez powietrze podczas wyładowania atmosferycznego czy w urządzeniach oświetleniowych wyładowczych. Jest też naturalnym zjawiskiem przy otwieraniu zestyków obwodu elektrycznego, co ma szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa przy wyższych napięciach i znacznych natężeniach prądu. Powstanie łuku elektrycznego w miejscu do tego nieprzeznaczonym stanowi zatem istotny problem. Gwałtowne wydzielenie energii stanowi realne zagrożenie dla użytkowników instalacji / urządzenia i samej instalacji, a zgaszenie łuku może okazać się problematyczne.

1.2. Rodzaje zabezpieczeń

Dziesięciolecia rozwoju elektrotechniki dały cały wachlarz narzędzi, które można, a nawet w myśl przepisów prawa: trzeba zastosować. Często pomijaną kategorią zabezpieczeń są zabezpieczenia nietechniczne, organizacyjne. Jak dowodzi niniejszy referat, to człowiek jest zwykle najsłabszym ogniwem szeroko pojmowanego systemu bezpieczeństwa. Środki organizacyjne to budowane przez lata instrukcje wykonywania prac pod napięciem, systemy pozwoleń na te prace, forma i treść szkoleń wstępnych, stanowiskowych i okresowych, budowanie i potwierdzanie kwalifikacji zawodowych pracowników w zakresie pracy przy instalacjach i urządzeniach elektrycznych, dbałość o skuteczność zbiorowych i indywidulanych środków ochrony pracownika. Składa się to na termin funkcjonujący w mentalności „zachodniej" cywilizacji, ostatecznie zyskujący coraz większe znaczenie także w Polsce: organizacyjna *kultura bezpieczeństwa* przedsiębiorstwa. Jeżeli właściciel firmy, zamiast utrzymywać służbę BHP wyłącznie dlatego, że wymagają tego przepisy, wyposaży ją w odpowiednie narzędzia do planowania, wdrażania i kontroli stanu bezpieczeństwa w zakładzie pracy, istnieje szansa, że poziom bezpieczeństwa będzie zadowalający.

Z rozwiązaniami technicznymi jest znacznie prościej niż z ludźmi. Aparat elektryczny wykonany zgodnie z aktualnym stanem techniki przez renomowaną firmę z wdrożonym systemem kontroli jakości będzie funkcjonował niezawodnie przez lata. Jako dowód można przytoczyć zajęcia laboratoryjne realizowane w Pracowni Elektroenergetyki Akademii Pożarniczej w Warszawie. Jedno z ćwiczeń studenckich dotyczy badania zabezpieczeń nadprądowych, w tym wyłączników instalacyjnych. Każdego roku studenci badają czasy zadziałania zabezpieczeń, przez co w każdym z tych aparatów wymuszane są zadziałania w liczbie rzędu nawet ok. 1500 razy rocznie. Mimo to aparaty te na stanowiskach nie są wymieniane częściej niż co kilkanaście lat. Jednocześnie w warunkach domowych zadziałanie tego typu zabezpieczeń to co najwyżej kilka zadziałań w roku. Daje to pogląd na temat niezawodności tych aparatów.

Na rynku stosuje się zabezpieczenia przed przetężeniem, przepięciem, porażeniem, czasami także przed wystąpieniem łuku elektrycznego. Przetężenie to zbyt duże natężenie prądu. Tutaj definicyjnie mowa o zwarciu, czyli niskooporowym połączeniu elektrycznym dwóch różnych potencjałów, a także o przeciążeniu, czyli zwykle przekroczeniu wartości znamionowej prądu o kilka- kilkanaście razy. Zabezpieczenie przed zwarciem wykorzystuje

zjawiska elektromagnetyczne: przepływ prądu powoduje powstanie siły elektrodynamicznej oddziałującej na ferromagnetyczny element wyłącznika, w konsekwencji prowadząc do mechanicznego rozłączenia zamka wyłącznika. Wyzwalacz przeciążeniowy wykorzystuje prawo Joule'a-Lenza, powoduje wydzielanie ciepła na bimetalicznym elemencie toru prądowego. Bimetal to zwykle dwie odpowiednio uformowane blaszki wykonane z różnych stopów metali, połączone ze sobą np. poprzez zgrzewanie. Różnice w składzie pierwiastkowym owych stopów przekładają się na różnice w rozszerzalności cieplnej, zatem po podniesieniu się temperatury bimetal ulegnie odkształceniu prowadząc do mechanicznego rozłączenia zamka wyłącznika.

O ile prądy znamionowe instalacji elektrycznej to zwykle kilkanaście – kilkadziesiąt amperów, o tyle porażenie człowieka jest niebezpieczne przy wartościach prądów o trzy rzędy wielkości niższych. Ochrona przed porażeniem wymaga zatem wykrycia przez aparat elektryczny nawet prądów rzędu pojedynczych miliamperów (dla domowych, dwubiegunowych / jednofazowych wyłączników RCD). Wyłącznik RCD (różnicowo-prądowy) wykorzystuje zatem zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Przez przekładnik Ferrantiego wyłącznika RCD przeprowadzone są przewody robocze, czyli dla instalacji jednofazowej przewody L i N. Przekładnik to w istocie pierścień ferromagnetyczny. Zgodnie z prawami indukcji elektromagnetycznej, prąd przepływający przez przewód fazowy i przewód neutralny wytworzy wokół przewodnika pole magnetyczne. Jeżeli taki sam prąd płynąć będzie przez oba przewody robocze, tj. w jednym kierunku przez przewód fazowy i w przeciwnym kierunku przez przewód neutralny, indukcja magnetyczna w pierścieniu ferromagnetycznym wytwarzana przez te przewody będzie równa co do wartości, ale przeciwna co do zwrotu. Wynikowa indukcja magnetyczna wyniesie zatem zero. Jeżeli jednak pojawi się dysproporcja prądów wpływających i wypływających do chronionego obwodu, co ma miejsce m.in. przy porażeniu prądem elektrycznym, wynikowa indukcja magnetyczna w przekaźniku Ferrantiego będzie większa od zera, co pozwoli na powstanie indukcji magnetycznej w obwodzie wyzwalacza różnicowo-prądowego, a w efekcie rozłączenie obwodu.

Ochrona przez przepięciem realizowana jest na różne sposoby. Trzy klasyczne rozwiązania przedstawione zostaną poniżej. Pierwsze dwa wykorzystują w istocie właściwości dielektryczne powietrza. Rosnące napięcie w sieci elektrycznej spowoduje przepływ prądu elektrycznego przez powietrze, jeżeli w ochronniku SPD wytrzymałość dielektryczna powietrza zostanie przekroczona. Wystarczy zatem odpowiednio uformować elektrody ochronnika, jedną z nich podłączyć do przewodu fazowego, a drugą do przewodu neutralnego*. Zależnie od typu ochronnika, stosuje się go przy głównym przyłączu do budynku i/lub w rozdzielnicy głównej. Tradycyjnie wykorzystuje się tzw. iskierniki, gdzie elektrody mają kształt stożków skierowanych w przeciwne strony. W ochronnikach stanowiących drugi stopień ochrony (typ 2) elektrody stanowią zwykle odpowiednio ukształtowane płaskowniki metalowe. Trzecim rozwiązaniem stosowanym w domowych instalacjach są warystory. Są to elementy półprzewodnikowe o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej. Warystor cechuje skokowy spadek rezystancji wewnętrznej zachodzący po przekroczeniu określonej wartości napięcia. Stosowany jest zwykle w ochronnikach typu 3, stosowanych bezpośrednio przed czułymi na przepięcia urządzeniami, np. w listwach przeciwprzepięciowych zabezpieczających telewizory czy komputery. Powyższy opis jest wyłącznie uogólnieniem, istnieją także m.in. rozwiązania kombinowane, których opisu nie obejmuje niniejszy referat.

Ochrona przed powstaniem łuku elektrycznego stosowana jest powszechnie m.in. w Stanach Zjednoczonych, obligatoryjnie co najmniej od kilkunastu już lat. System elektroenergetyczny w Stanach Zjednoczonych różni się od systemu europejskiego. Rozwiązania wspomnianego już wcześniej Tesli zakładały wykorzystanie układu dwufazowego, stąd amerykańska sieć ma dwie fazy o napięciu znamionowym 120 V, jednak wektory napięć znajdują się w przeciwfazie, tj. kąt między nimi wynosi 180 stopni. Częstotliwość sieci to 60 Hz. W Europie M. Doliwo-Dobrowolski szybko zauważył, że większe korzyści, w tym efektywność, niesie ze sobą układ trójfazowy. Stąd kąt między wektorami wynosi w Polsce 1/3 kąta pełnego. Zwiększono także napięcie skuteczne do 230 V, dzięki czemu częstotliwość mogła być zredukowana do 50 Hz, co przekłada się na prędkość synchroniczną wynoszącą 3000 obr/min. Co istotne, przy niższym napięciu w Stanach Zjednoczonych, osiągniecie tej samej mocy wymaga większy prądów. Zgodnie z prawem Paschena, napięcie 120 V jest napięciem wystarczającym do powstania łuku elektrycznego nawet przy pojedynczych amperach. Skoro zatem w amerykańskiej sieci elektrycznej niskiego napięcia można spodziewać się istotnie wyższych prądów roboczych, warunki powstania łuku elektrycznego są korzystniejsze, a jego stabilność (a zatem i trudność w jego ugaszeniu) jest niższa. Istotną część pożarów w Ameryce Północnej powiązano z przyczyną w postaci właśnie łuku elektrycznego, stąd wspomniany wymóg powszechnego stosowania aparatów elektrycznych wykrywających łuk.

W jaki sposób wykryć łuk elektryczny, jeżeli jego powstanie i stabilne palenie się jest możliwe w zakresie prądów roboczych instalacji elektrycznych? Zabezpieczenia łukochronne (AFCI, ang. arc-fault circuit interrupter) są w istocie urządzeniami elektronicznymi, które wykrywają dynamiczną charakterystykę łuku elektrycznego. Po wykryciu doprowadzają do rozłączenia obwodu. W Europie, w związku głównie z wyższymi napięciami znamionowymi sieci, wymóg stosowania tego typu urządzeń nie został jeszcze prowadzony, niemniej ryzyko powstania łuku elektrycznego jest większe w obwodach prądu stałego. Stąd układy przekształtnikowe stosowane w instalacjach fotowoltaicznych są coraz częściej wyposażane właśnie w tego typu zabezpieczenia.

Po wprowadzeniu czytelnika w tematykę zagrożeń pożarowych, a także sposobów zabezpieczania urządzeń i instalacji elektrycznych oraz ich użytkowników przed skorelowanymi z nimi zagrożeniami, przedstawione zostaną wybrane studia przypadku, będące przedmiotem rzeczywistych dochodzeń mających na celu ustalenie prawdopodobnej przyczyny pożaru.

2. Case study

2.1. Wybuch łuku elektrycznego w rozdzielnicy nn

Łuk elektryczny, ze względu na swoją wysoką temperaturę, zawsze będzie wydzielał do otoczenia znaczne ilości energii. Obecność materiału palnego w otoczeniu miejsca powstania łuku elektrycznego zawsze zwiększa ryzyko pożaru – wpływa na prawdopodobieństwo jego powstania, a także na rozmiar potencjalnych skutków zdarzenia.

Łuk elektryczny ma potencjał do topienia przewodników, przede wszystkim elementów przewodzących instalacji i urządzeń elektrycznych. Warto dodać, że temperatury osiągane podczas typowych pożarów nie przekraczają temperatury topnienia metali innych niż

aluminium. Z jednej strony powoduje to zawsze charakterystyczne ślady łuku elektrycznego – wytopienia np. w obudowie rozdzielnicy. Z drugiej strony, sam łuk elektryczny, w określonych warunkach, może wydzielać tak znaczną moc, że jego obecność doprowadzi do gwałtownego stopienia metalu, przyrostu ciśnienia, zapoczątkowania spalania cząstek metalu / jego par, ewentualnie wznieconych przez podmuch innych części palnych. Wybuch tego typu ma dynamiczny charakter, powoduje istotne obrażenia pracowników przebywających w jego zasięgu, jeżeli nie są zabezpieczeni przed łukiem elektrycznym (dedykowana odzież ochronna: pełna ochrona głowy i wizjerem ochronnym, ochrona szyi i ramion, pełne ubranie ochronne). W anglojęzycznej literaturze zjawisko to nazywane jest *arc flash*, często tłumaczone na polski jako *wybuch łuku elektrycznego*. Należy rozróżnić to zjawisko od samego łuku elektrycznego, którego wystąpienie możliwe jest w szerokim wachlarzu napięć znamionowych, zgodnie z prawem Paschena. Zagrożenie wybuchu łuku elektrycznego jest znane, a pracownicy, szczególnie służba elektroenergetyczna w danym zakładzie przemysłowym, zabezpieczani są przed jego wystąpieniem. Zagrożenie jednak utożsamia się głównie z co najmniej średnim napięciem (SN), gdzie łatwiej o stabilne palenie się łuku elektrycznego, a wydzielana przez łuk moc jest ogromna. Niemniej wystąpienie tego zjawiska w instalacji nn również jest możliwe.

W pewne poniedziałkowe przedpołudnie pracownik zauważył problemy z zasilaniem jednego z obiektów znajdujących się wewnątrz hali przemysłowej. Otworzył więc rozdzielnicę oddziałową i zaczął poszukiwać potencjalnych przyczyn problemów. Z rozdzielnicy zasilane były dwa urządzenia przemysłowe dużej mocy, a także szereg obwodów o mniejszej mocy. Pracownik najpewniej odłączył aparat elektryczny zasilający problematyczny obwód i przyglądał się rozdzielnicy, szukając pomysłu na usunięcie problemu. Nagle oślepił go błysk białego światła, ogłuszył intensywny huk, a przyrost ciśnienia powalił go na plecy. W całej hali przemysłowej wyłączyło się zasilanie.

Podczas oględzin pod kątem ustalenia pierwotnej przyczyny pożaru zidentyfikowano niezaprzeczalne ślady łuku elektrycznego. Widoczne one były w górnej części rozdzielnicy, wskazując na zwarcia łukowe pomiędzy szynoprzewodami fazowymi i neutralnym, a także pomiędzy szynoprzewodami fazowymi i skutecznie uziemioną obudową rozdzielnicy. Nie dało się jednak zidentyfikować przyczyny, dla której łuk elektryczny miałby powstać w tym miejscu, biorąc pod uwagę zachowanie odstępów izolacyjnych, czy brak jakichkolwiek śladów części przewodzących obcych, np. narzędzia, lub zwierząt.

Poza relacjami świadków nie było źródeł informacji na temat przebiegu zdarzenia. Monitoring przemysłowy zatrzymał rejestrację w momencie wystąpienia anomalii w zasilaniu, najprawdopodobniej w chwili wystąpienia łuku i gwałtownym zapadzie napięcia. Dokumentacja instalacji elektrycznej przechowywana była… na rozdzielnicy, więc znaczna jej część uległa spaleniu.

Główne zabezpieczenie stanowił nowoczesny aparat elektryczny z możliwością rejestracji danych. Mimo zniszczeń termicznych udało się odczytać z niego dane. Niestety, po montażu w rozdzielnicy ustawienia fabryczne nie zostały w żaden sposób zmodyfikowane, przez co z niezliczonych możliwości w zakresie rejestracji danych, w tym anomalnych, rejestracji podlegały w zasadzie zaniki napięcia i jego przywrócenie. Na marginesie, jest to niestety częsta praktyka, szczególnie w instytucjach o dużej bezwładności decyzyjnej. Montowanie drogiego i nowoczesnego aparatu elektrycznego powinno się wiązać z wykorzystaniem jego funkcjonalności, co ma znaczenie nie tylko z punktu widzenia dochodzenia popożarowego.

W tym przypadku możliwe było jednak dość szczegółowe odtworzenie przebiegu zdarzenia. Powstanie łuku w układzie równoległym powoduje istotny spadek napięcia, który wpływa na stabilność pracy zasilanych urządzeń. Pracownik odłączył aparat, który podejrzewał o usterkę, a prace wykonywał pod napięciem. Aparat ten znajdował się w jednym z rzędów aparatów znajdujących się w dolnej części rozdzielnicy, mniej więcej w jego połowie.

Po odłączeniu zabezpieczenia pracownik nie zabezpieczył przewodów. Mimo bezczynności samego pracownika w chwili zdarzenia (zgodnie z jego relacją, wyłącznie przyglądał się rozdzielnicy), na skutek działania sił sprężystości, przewód / przewody powolnie wracały w stronę swojej pierwotnej pozycji. Po zbliżeniu się na krytyczną odległość od zacisków zabezpieczenia powstał łuk elektryczny. Gwałtowna jonizacja powietrza, przyrost ciśnienia i wytworzenie cząstek metalu (być może od razu w trzech stanach skupienia) w niewielkiej objętości (zdemontowana była jedynie osłona danego rzędu zabezpieczeń) najpewniej doprowadziła do pogorszenia się warunków izolacyjności pomiędzy szynoprzewodami i do przeniesienia się łuku elektrycznego w górne partie rozdzielnicy.

Jak wspomniano, powstanie łuku elektrycznego jest możliwe w każdych warunkach zasilania. Niemniej w tym przypadku doszło ewidentnie do zjawiska *arc flash*. Nie jest to typowe dla rozdzielnic nn, niemniej w tym przypadku stacja transformatorowa znajdowała się kilka metrów dalej, co wobec znacznych przekrojów szynoprzewodów, istotnie obniżyło rezystancję pętli zwarcia, a więc stworzyło bardzo korzystne warunki do zajścia tego zjawiska, tj. prądy zwarciowe osiągnęły wyraźnie wyższe wartości niż w typowej domowej sieci. W tym przypadku najprawdopodobniej pierwotny łuk elektryczny miał charakter równoległy.

Można podsumować, że w tym przypadku błąd ludzki był przyczyną zdarzenia, a wymiar materialny jego skutków osiągnął rząd wielkości setek tysięcy złotych. Warto też dodać, że jedno z zabezpieczeń umieszczone w górnej części rozdzielnicy w trakcie oględzin znajdowało się w trybie TRIP, co sugerowałoby zadziałanie. Niemniej obwód ten nie pracował w trakcie zdarzenia, co mogłoby wprowadzić w błąd. Najpewniej zadziałanie zabezpieczenia (termicznego) nieobciążonego obwodu wynikało z przyrostu temperatury spowodowanego paleniem się łuku w bezpośrednim sąsiedztwie aparatu.

2.2. Pożar układu kompensacji mocy biernej

Kompensacja mocy biernej pozwala na znaczące oszczędności w warunkach przemysłowych. Praca urządzeń o charakterze pojemnościowym lub indukcyjnym, poza mocą czynną, wymaga dostarczenia mocy biernej. Typowy przykład z ostatnich dekad to zakład przemysłowy, gdzie wykorzystuje się silniki elektryczne indukcyjne o znacznej sumarycznej mocy. Uzwojenia silników stanowią przykład wyraźnie indukcyjnych odbiorników. W trakcie pracy silnika energia elektryczna zamieniana jest w obwodzie magnetycznym do postaci energii pola magnetycznego, a potem ponownie do postaci energii elektrycznej, zwracanej do sieci zasilającej. Jest to immamentna cecha pracy silników elektrycznych. Moc bierna krąży zatem pomiędzy jednostką wytwórczą a zakładem przemysłowym. Odpowiadają za to prądy bierne, które w myśl prawa Joule'a-Lenza powodują wydzielanie się ciepła w sieci, a zatem odpowiadają za straty na przesyle energii elektrycznej. Ponieważ zakład przemysłowy płaci rachunki za zużycie mocy biernej, strata ta leżałaby po stronie dostawcy energii, a najpewniej kompensowana byłaby przez dodatkowe opłaty, których wielkość zależy od wartości mocy biernej, czy powiązanego współczynnika cos φ. Rozwiązanie tego problemu to właśnie układ

kompensacji mocy biernej. W tradycyjnym podejściu obliczano wartość reaktancji indukcyjnej, zwanej oporem biernym, a na podstawie tych obliczeń określano wymaganą pojemność baterii kondensatorów, montowanych przy przyłączu energetycznym, z uwzględnieniem, co oczywiste, napięć i prądów znamionowych w zakładzie.

Nowoczesne układy kompensacyjne sterowane są elektronicznie, przez co pozwalają na elastyczną pracę, także wtedy, kiedy w zakładzie charakter obciążenia jest zmienny, tj. profil pracy odbiorników nie jest stały. Układ załącza kolejne sekcje kompensacji, przy zmiennym wykorzystaniu mocy biernej. W istocie w obecnych czasach coraz częściej stosuje się kompensację mocy biernej układami o charakterze mieszanym lub wręcz wyłącznie indukcyjnym, ponieważ powszechnie stosowane urządzenia energoelektroniczne (przekształtniki – falowniki, przetwornice częstotliwości, itp.) cechuje znacząca wartość reaktancji pojemnościowej. Niemniej w opisywanym przypadku układ kompensacji mocy biernej stanowił kilka sekcji baterii kondensatorów, załączanych według bieżących potrzeb.

Układ pojemnościowej kompensacji mocy biernej może stanowi zagrożenie pożarowe. Determinuje to w istocie przede wszystkim stan kondensatorów, które podlegają często dość ciężkim warunkom pracy. Z każdym cyklem pracy degradacji ulega dielektryk. Skrócenie żywotności wynika dodatkowo z jakości energii elektrycznej w zakładzie, a zatem pośrednio z charakteru odbiorników. Starzejący się kondensator da się jednak zdiagnozować. Degradacja dielektryka wiąże się z powstawaniem wyładowań niezupełnych, co objawia się rosnącym udziałem wyższych harmonicznych w przebiegach rejestrowanych podczas badań okresowych. Obowiązujące przepisy wymagają przeprowadzania badań okresowych nie rzadziej niż co 5 lat, przy czym w warunkach szczególnych ten czasookres powinien być skrócony. Wydaje się rozsądne przyjąć, że pomiary układu kompensacji mocy biernej należy prowadzić nie rzadziej niż co rok. Świadczy o tym także fakt, że kondensatory pracujące w trudnych warunkach (ze względu na liczbę cykli, choć także ze względu na warunki środowiskowe) wymieniane są zwykle częściej niż co 5 lat, jak wynika z rozmów z inżynierami.

Dokładnie tego problemu dotyczy niniejsze *case study*, a w zasadzie co najmniej dwa duże pożary o jednakowej przyczynie. W układzie kompensacji mocy biernej w zakładzie przemysłowym przeprowadzono badania okresowe. Udział wyższych harmonicznych przekroczył dopuszczalne wartości, co jednoznacznie wskazywało na potrzebę wymiany kondensatorów. Niestety, właściciel nie zdecydował się wdrożyć zaleceń pokontrolnych w życie, przez co po kilku miesiącach od badań okresowych dielektryk w kondensatorze ostatecznie uległ zniszczeniu i doprowadził do pożaru. W tej sytuacji często możliwe jest zidentyfikowanie źródła pożaru ze wskazaniem konkretnego kondensatora, o ile pracownicy podejmą działania gaśnicze niezwłocznie, a dzięki temu pożar nie rozprzestrzeni się znacznie. Tutaj ponownie potwierdza się waga kultury organizacyjnej przedsiębiorstwa, przygotowanie pracowników do reagowania na tego typu zdarzenia, biorąc pod uwagę czas trwania alarmowania, dysponowania i dojazdu na miejsce zdarzenia straży pożarnej.

Czy można w tym przypadku mówić o przyczynie technicznej pożaru? Nieodpowiedniej jakości podzespołów? Wydaje się, że nie. Właściciel pojazdu, który mimo upomnień mechanika nie wymienił hamulców, przez co ostatecznie spowodował poważne zdarzenie drogowe nie powinien mieć roszczeń do ubezpieczyciela, który odmówił wypłaty odszkodowania. Choć w opisywanym przypadku takie roszczenia były. Pomijając sens i

moralność tego typu prawnych zabiegów, gdyby nie to, przypadek ten nie mógłby być tutaj opisany.

2.3. Zagadkowy pożar instalacji fotowoltaicznej

W pomieszczeniu garażu, w warunkach zimowych, właściciel identyfikuje zamarzniętą wodę w rurach wodociągowych. Podłącza więc termowentylator, kieruje strumień ciepłego powietrza na rury i przechodzi do części mieszkalnej domu. Po kilku minutach zauważa brak zasilania w energię elektryczną, wraca do garażu i zauważa rozwinięty pożar, lepik kapiący z dachu i płomienie trawiące przekrycie dachowe.

W garażu przechowywana była zrębka drzewna w foliowych workach, składowana w znacznych ilościach na opróżnionych beczkach w rogu garażu, gdzie pożar, zgodnie z relacją właściciela, przez kilka minut nieobecności przyjął poważne rozmiary. Pierwsze dochodzenie popożarowe przeprowadzone przez lokalnego biegłego doprowadziło do konkluzji, że termowentylator musiał doprowadzić do zapłonu worków ze zrębką drzewną, być może na skutek niewystarczającego chłodzenia grzałek lub awarii urządzenia. Właściciel nie przyjął jednak takiej narracji, podając niepodważalny argument, że w okolicy termowentylatora nie było w zasadzie materiału palnego, a odległość pomiędzy wentylatorem a workami z materiałem palnym, gdzie pożar osiągał największe rozmiary, wynosiła kilka metrów w linii prostej. Istotnie, powstanie pożaru w takich warunkach od termowentylatora nie mogło być możliwe. Sąd powołał zatem kolejnego biegłego, który tym razem wskazał na instalację fotowoltaiczną, znajdującą się na dachu budynku.

Właściciel nieruchomości oczekiwał odszkodowania za niewłaściwie wykonaną instalację fotowoltaiczną od jej wykonawcy. Biegły sądowy przedstawił hipotezę dot. właśnie tej przyczyny powstania pożaru, jednak szczęśliwie (dla procesu dochodzenia do prawdy), falownik komunikował się przez internet z serwerami producenta, przez co uzyskano dostęp do informacji o produkcji energii elektrycznej, a także o temperaturze na poziomie falownika oraz modułów fotowoltaicznych. Ponieważ na panelu fotowoltaicznym zalegała w przeważającej większości gruba warstwa śniegu, produkcja nie przekraczała kilkudziesięciu watów, co wobec skrajnie niskich prądów w każdym z dwóch stringów, na mocy prawa Paschena, pozwoliło wykluczyć możliwość powstania łuku elektrycznego. Także wartości temperatur na poziomie dachu i falowniku zaprzeczały scenariuszowi, żeby łuk elektryczny doprowadził do powstania pożaru przy panelu PV, nie wspominając o prawach fizycznych określających wymianę ciepła, istotnie powolniejszą w kierunku ku dołowi niż w przypadku konwekcji. Zagadką zatem pozostawała rzeczywista przyczyna pożaru.

W takich sytuacjach uwagę przykuwać muszą bardzo niewielkie wskazówki. Osoba prowadząca dochodzenie musi także mieć świadomość zjawiska psychologicznego, polegającego na tym, że człowiek ma przyrodzoną tendencję do poszukiwania przesłanek potwierdzających wyznawane teorie i hipotezy, a także do ignorowania faktów przeczących, czy choćby niespójnych z nimi. Z resztą otwartość umysłu i gotowość ciągłej konfrontacji docierających do nas informacji wydaje się być kluczowa w obecnych czasach. Wracając jednak do dochodzenia. Istotnym faktem był zanik zasilania w całej nieruchomości, a nie tylko np. w obwodzie zasilającym termowentylator, co wykluczało (obok wyraźnych śladów pożarowych) stan awaryjny tego urządzenia. Jednocześnie dynamika pożaru nakazywała szukać jeszcze innego, trzeciego scenariusza.

Należy podkreślić, że dochodzenie pożarowe służy określeniu najbardziej prawdopodobnej przyczyny pożaru, a możliwość jednoznacznego jej wskazania jest często niemożliwa. W tym przypadku pojawiły się jednak kolejne interesujące przesłanki. Właściciel zeznał, że zrębka drzewna składowana była na beczkach (w dniu zdarzenia już opróżnionych, co sugerowało, że nie zawsze były puste). Właściciel zeznawał, że w beczkach były materiały ropopochodne, być może paliwo. Czy jednak śladowe ilości cieczy palnych, pozostałe w beczkach mogą mieć wpływ na powstanie pożaru? W warunkach zimowych parowanie jest bardzo ograniczone, jednocześnie trudno wyobrazić sobie rozsądne źródło zapłonu w tak stabilnych warunkach. Warto nadmienić, że w tym samym rogu garażu znajdowało się przyłącze energetyczne, a pięciożyłowy przewód wychodził od strony wewnętrznej z pola pomiarowego i wprowadzony był pod tynk / pod wylewkę, przy czym przewód ten odsłonięty był na odcinku może kilkunastu centymetrów. To wprowadza nowy aspekt do sprawy – energia elektryczna wydzielona w tym miejscu, np. w formie łuku elektrycznego, mogłaby mieć potencjał doprowadzenia do tak gwałtownego pożaru. Niemniej nieruchomość była wybudowana kilka lat wcześniej, trudno podejrzewać tak poważną awarię instalacji elektrycznej, która spowodowałaby powstanie łuku elektrycznego. Potencjalna awaria zasilania mogłaby przecież ujawnić się w dowolnym momencie i nie w tak dramatyczny sposób. Chyba, że właściciel podczas procesu opróżniania beczek z ropopochodnymi nie uniknął rozchlapywania tejże cieczy. Jak wiadomo, standardowa izolacja polwinitowa przewodów jest wrażliwa na ropopochodne, powodują one w istocie rozpuszczanie polimeru. Izolacja osłabia się, twardnieje i staje się bardziej krucha. Nie można także zapomnieć o siłach elektrodynamicznych, które towarzyszą gwałtownemu przepływowi prądu, a taki niewątpliwie miał miejsce w chwili podłączenia do zasilania termowentylatora. Mimo, iż typowy termowentylator cechować będzie moc rzędu kilku kilowatów, to do momentu rozgrzania się rezystancyjnych grzałek pobór prądu będzie znaczący, tj. wystąpi wysoki prąd rozruchowy. Siła elektrodynamiczna jest proporcjonalna do natężenia prądu, więc fakt podłączenia wentylatora mógł stanowić ten ostatni element układanki, powodujący poruszenie się przewodu zasilającego, wykruszenie izolacji lub po prostu zmianę warunków dielektrycznych, a w konsekwencji zapalenie się łuku elektrycznego. Bezpośrednie sąsiedztwo worków foliowych ze zrębką drzewną, a także odsłonięta konstrukcja nośna dachu pokrytego papą było determinantą dalszego rozwoju wypadków.

Tego typu przypadki są niezwykle pouczające. Nie sposób oddać w krótki artykule złożoność procesu analitycznego. Niemniej rozważono wiele innych możliwych (czy typowych) przyczyn pożarów, z których tylko dla takiego scenariusza nie udało się znaleźć choćby przesłanek zaprzeczającej postawionej hipotezie.

3. Wnioski

Biorąc pod uwagę przeprowadzone rozważania i zaprezentowane przykłady rzeczywistych dochodzeń pożarowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Rozwiązania techniczne, o ile zostały prawidłowo zaprojektowane, wykonane, a następnie zainstalowane i użytkowane, skutecznie zabezpieczają instalacje i urządzenia elektryczne, a także skutecznie chronią użytkownika przed typowymi zagrożeniami.
- Istnieje wyjątkowo obrazowa teoria *sera szwajcarskiego*, gdzie każdy z technicznych lub organizacyjnych środków bezpieczeństwa (np. zabezpieczenia

kolejnych poziomów, procedury organizacyjne, redundantne systemy zabezpieczeń, itp.) stanowi oddzielną barierę. Każda bariera jest jednak zawodna, tj. posiada *otwór*, niczym dziura w plastrze sera. Jeżeli wystąpi niekorzystne zdarzenie, a wspomniane *dziury* ustawią się w jednej linii, żadna z barier bezpieczeństwa nie zadziała, co doprowadzi np. do pożaru. To ciekawa ilustracja znaczenia właściwego planowania zabezpieczeń i przewidywania scenariuszy zdarzeń.

- Wydaje się, że bardzo często to człowiek jest elementem szeroko pojmowanego łańcucha niezawodnościowego, który zawodzi najczęściej. Tutaj przyczyny należy szukać w niedostatkach wiedzy, nieświadomości zagrożeń, a często niestety w nierzetelności, czy nawet niechlujstwie w wykonywaniu swoich obowiązków, braku właściwej kultury bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie. Z przykrością można też stwierdzić, że niezmiennie największa batalia na tym polu toczy się wręcz z ignorancją i silnie zakorzenionym lekceważeniem zasad bezpieczeństwa.
- W praktyce przemysłowej często spotyka się przykłady stosowania wysokiej klasy aparatów elektrycznych wyposażonych w możliwość rejestracji różnych danych, w tym odbiegających od wartości uznanych za typowe. Niemniej często aparaty te nie są odpowiednio skonfigurowane, przez co funkcjonalności, które podnoszą cenę aparatu nie są w ogóle lub są marginalnie wykorzystywane. Dane, które tego typu aparaty mogłyby rejestrować byłyby przydatne nie tylko w trakcie postępowań popożarowych, ale także do diagnostyki usterek i awarii.
- Stosowanie sprawdzonych metod diagnostycznych, w tym badań okresowych instalacji i urządzeń elektrycznych, jest często gwarantem bezpieczeństwa i bezpośrednio wpływa bezpieczeństwo pożarowe. W tym aspekcie system bezpieczeństwa wymaga jednak wysokiej kultury organizacyjnej. Statystyki pożarowe dotyczą pożarów, które miały miejsce – z oczywistych względów nie jest możliwe statystyczne dowodzenie liczby pożarów, jakich uniknąć pozwoliły stosowane środki bezpieczeństwa.
- Poprawne określenie prawdopodobnej przyczyny pożaru jest zawsze wyzwaniem, szczególnie jeżeli dostępność danych jest ograniczona. Niestety, braki wiedzy z zakresu elektrotechniki u biegłych sądowych z zakresu badania przyczyn pożarów niejednokrotnie doprowadziły do powstania niskiej jakości opracowań dopuszczonych do postępowań sądowych, wydłużających procesy przez całe lata, opracowań podważających prawa fizyki. Kluczowa jest świadomość odpowiedzialności za tworzone opinie kierowane do sądu, a także konsekwencji błędnych czy nierzetelnych opinii.
- Jakkolwiek wyświechtane jest sformułowanie potrzeby budowania świadomości zagrożenia i krzewienia wiedzy z zakresu inżynierii, w tym inżynierii bezpieczeństwa, aspekt ten ciągle ma kluczowe znaczenie społeczne. Należy konsekwentnie podejmować wysiłki mające na celu przystępny i skuteczny transfer wiedzy pomiędzy światem akademickim i praktykami.