



Sergiusz Boron

Politechnika Śląska
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa
sergiusz.boron@polsl.pl

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA KOPALNIANYCH SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie: Sieci elektroenergetyczne w podziemnych zakładach górniczych projektowane są w znacznym stopniu na podstawie przepisów i norm uwzględniających specyficzne warunki środowiskowe ich pracy. Z tego powodu przydatność wielu dostępnych programów komputerowych wspomagających projektowanie tych sieci jest ograniczona, gdyż oprogramowanie to nie uwzględnia specyfiki górnictwa. W Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej opracowane zostało oprogramowanie o akronimie SNN przeznaczone do projektowania niskonapięciowych sieci dołowych. W artykule przedstawiono najważniejsze właściwości oprogramowania, możliwości dostosowania programu do potrzeb użytkownika, sposób odwzorowania elementów sieci, zasady tworzenia jej modelu numerycznego, a także cechy algorytmu obliczeniowego. Opisane zostały również doświadczenia twórców oprogramowania dotyczące kontaktów z użytkownikami oraz możliwości wykorzystania programu do analiz o charakterze naukowym.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie projektowania, kopalniane sieci elektroenergetyczne, oprogramowanie SNN.

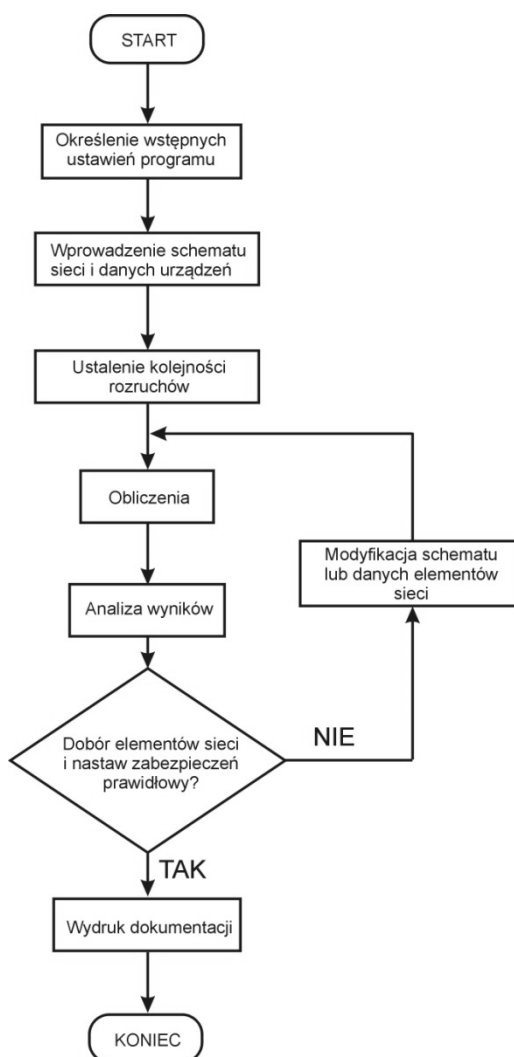
Wprowadzenie

Prawidłowe zaprojektowanie stosowanych w górnictwie sieci elektroenergetycznych jest jednym z najistotniejszych warunków zapewnienia bezpieczeństwa elektrycznego i niezawodności zasilania. Stany zagrożeniowe wynikają z zakłóceń w pracy sieci, a właściwy dobór elementów sieci pozwala zmniejszyć liczbę zaburzeń występujących przy przesyłaniu energii elektrycznej do odbiorni-

ków. Stosowanie właściwych środków technicznych, np. komputerowego wspomaganie projektowania (CAD), pozwala na usprawnienie (przyspieszenie) procesu projektowania kopalnianych sieci elektroenergetycznych, przy zachowaniu odpowiedniej dla obliczeń inżynierskich dokładności. Na rynku dostępne jest oprogramowanie ogólnego przeznaczenia do projektowania sieci elektroenergetycznych przemysłowych, jednakże przydatność takich programów do projektowania sieci kopalnianych jest niewielka ze względu specyfikę górnictwa. Specyfika ta polega na odmiennych regulacjach przepisowych obowiązujących dla sieci górniczych, innych układowych i środowiskowych (narażenia, zagrożenia) warunków pracy sieci kopalnianych, a także ze specyficznej budowy górniczych urządzeń sieciowych. Twórcy oprogramowania ogólnego przeznaczenia zwykle nie są zainteresowani dostosowaniem go do potrzeb przemysłu górniczego z uwagi na stosunkowo niewielkie grono potencjalnych użytkowników. Z powyższych względów w Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej ponad 20 lat temu rozpoczęto prace nad oprogramowaniem do komputerowego wspomaganie projektowania kopalnianych sieci elektroenergetycznych o nazwie SNN [Krasucki, Cholewa, Miśkiewicz, 1993]. Program ten stosowany jest, począwszy od 1998 r., w większości polskich kopalń węgla kamiennego, soli i rud miedzi, a także w innych instytucjach związanych z energetyką górnictwem (biura projektowe, ośrodki pomiarów i automatyki, firmy produkujące aparaturę elektryczną). Program SNN może być wykorzystywany do projektowania sieci niskonapięciowych o napięciu 1000 V, 500 V, 220 V, 127 V, a także sieci zasilających maszyny przodkowe o napięciu nominalnym 3,3 kV i 6 kV. Oprogramowanie SNN przystosowane jest do obliczania sieci, z których zasilane są tylko odbiorniki trójfazowe. Przyjęte wstępnie zasadnicze założenia dotyczące sposobu obsługi i funkcjonalności oprogramowania okazały się trafne, natomiast zebrane od użytkowników uwagi, a również własne doświadczenia twórców wykorzystano do bieżących modyfikacji i uaktualniania programu. Niniejszy artykuł prezentuje omówienie wybranych uwag dotyczących oprogramowania SNN, mogących być przydatnymi dla jego użytkowników oraz twórców oprogramowania o podobnym charakterze.

1. Ogólna charakterystyka oprogramowania SNN

Uproszczony schemat blokowy pokazujący poszczególne etapy projektowania z wykorzystaniem programu SNN zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy oprogramowania SNN

Rozpoczęcie projektowania sieci wymaga ustalenia wstępnych parametrów programu, w tym rozmiaru arkusza projektowego, stopnia niebezpieczeństwa wybuchu w pomieszczeniu, w którym znajduje się sieć, rodzaju i wielkości czcionki, opcji rysowania itp. Szczególnie ważnym zadaniem użytkownika jest również wprowadzenie, aktualizacja lub sprawdzenie poprawności opisu urządzeń będących elementami sieci. Opisy elementów sieci, w tym wyposażenie elektryczne urządzeń, schemat wewnętrzny i parametry elektryczne, znajdują się w kilkunastu plikach tekstowych (katalogach). Przewidziano odrębne katalogi

m.in. dla stacji transformatorowych, rozruszników kopalnianych, silników, kabli i przewodów czy zespołów transformatorowych. W odrębnych katalogach znajdują się dane dotyczące aparatury elektrycznej stanowiącej wyposażenie urządzeń, dotyczy to m.in. wyłączników, styczników, wyzwalaczy, przekaźników zabezpieczeniowych i bezpieczników topikowych. Oprogramowanie wprowadzane jest z przykładowymi katalogami urządzeń, jednakże po stronie użytkownika leży odpowiedzialność za poprawność wprowadzanych danych, szczególnie wobec zautomatyzowania czynności projektowych przewidzianych w programie. Błędne dane (np. parametrów kabli) mogą skutkować poważnymi i powielającymi się błędami w wynikach obliczeń. Szczegółowy opis sposobu wypełniania katalogów znajduje się w instrukcji użytkownika [Boron, Cholewa, Miśkiewicz, 2015] i systemie pomocy programu SNN.

Po ustaleniu wstępnych ustawień użytkownik przechodzi do wprowadzania informacji dotyczących układu (schematu) sieci, co polega na wstawianiu symboli graficznych poszczególnych urządzeń w obszarze roboczym arkusza projektowego i wskazywaniu połączeń między zaciskami. Podstawowe symbole graficzne dostarczane są razem z oprogramowaniem, przy czym użytkownik ma możliwość zdefiniowania własnego symbolu urządzenia. Jednocześnie, w zależności od typu elementu sieci, wprowadza się lub wybiera odpowiednie dane dotyczące np. parametrów znamionowych silników, długości, typu i przekroju kabla itp. Kolejnym etapem użytkownika jest przejście do procedury obliczeniowej. W zależności od określonego przez użytkownika trybu, obliczenia przebiegają przy różnym stopniu interaktywności. Na przykład nastawa zabezpieczenia zwarciovego może być dobierana automatycznie z dozwolonego przedziału nastaw lub wprowadzana przez użytkownika indywidualnie dla każdego zabezpieczenia. W przypadku, gdy wyniki obliczeń nie odpowiadają wymaganiom, schemat należy zmodyfikować (np. zmienić układ sieci bądź przekroje lub długości przewodów, zastosować inny typ urządzenia itp.) i ponownie przeprowadzić obliczenia. Najczęstsze powody takiej sytuacji to brak możliwości doboru nastawy zabezpieczenia zwarciovego, zbyt duże spadki napięć przy pracy ustalonej lub podczas rozruchu oraz zbyt duże obciążenie prądowe kabli lub przewodów. Dane projektowe (schemat sieci) oraz wyniki obliczeń zestawione są w tabeli, które zostały tak skonstruowane, że mogą stanowić dokumentację projektową.

2. Wybrane problemy użytkowania oprogramowania SNN

Przy opracowywaniu założeń do oprogramowania SNN przyjęto, że oprogramowanie to powinno się charakteryzować – z punktu widzenia użytkownika – następującymi cechami:

- poprawnością,
- elastycznością (określonym poziomem przystosowalności),
- łatwością obsługi,
- stabilnością (odpornością i przewidywalnym zachowaniem się w przypadku nieprzewidzianych lub błędnych danych wejściowych).

Poprawność algorytmu obliczeniowego – czyli jego kompletność, bezbłądność i wystarczająca dokładność obliczeń – jest podstawowym warunkiem przydatności programu wspomagającego projektowanie. Pozostałe z wymienionych wyżej cech są również istotne, a kontakt z użytkownikami oraz ich krytyczne uwagi pozwoliły na poprawę funkcjonalności i uzupełnienie możliwości programu.

Przez elastyczność programu można rozumieć umożliwienie użytkownikowi wprowadzenia do katalogów (oraz uwzględniania w obliczeniach i doborze) nowych urządzeń i aparatów. Przy opracowywaniu oprogramowania przyjęto zasadę „otwartości” katalogów urządzeń, dzięki czemu każdy użytkownik ma pełną swobodę w zakresie definiowania nowych lub modyfikowania istniejących elementów projektowanych sieci. Tworzenie opisów urządzeń w katalogach jest jednym z zadań sprawiających największe trudności użytkownikom.

Jak już zaznaczono wcześniej, odpowiedzialność za prawidłowość wypełnienia katalogów urządzeń, a także sprawdzenie poprawności wpisów w katalogach dostarczonych wraz z programem SNN, leży po stronie użytkownika, który powinien wprowadzić (względnie sprawdzić) informacje dotyczące parametrów urządzenia i jego układu (struktury połączeń wewnętrznych). Przyjęto tu pewien umowny sposób postępowania, który musi być ściśle przestrzegany. Opis urządzenia w programie SNN składa się z dwóch części:

- 1) symbolu graficznego urządzenia, którego wygląd nie wpływa na wyniki obliczeń, natomiast definicja symbolu zawiera listę i współrzędne tzw. zacisków zewnętrznych (do których przyłącza się kable lub przewody) oraz wewnętrznych, stanowiących punkty węzłowe schematu głównego toru prądowego urządzenia,
- 2) opisu wyposażenia i struktury połączeń wewnętrznych, przy czym z punktu widzenia obliczeń sieciowych istotne są jedynie te elementy, których parametry mogą decydować o poprawności doboru (do elementów nieistotnych dla obliczeń można zaliczyć obwody pomocnicze, obwody sterowania itp.).

Przyjęty sposób definiowania struktury wewnętrznej zapewnia możliwość wprowadzenia do katalogu praktycznie dowolnego urządzenia. Błędne wprowadzenie struktury urządzenia może prowadzić do utworzenia wewnątrz urządzenia pętli o zerowej impedancji (w takim przypadku niemożliwe jest obliczenie rozpręgu prądów w sieci) lub do odtworzenia przez program nieprawidłowej struktury projektowanej sieci (np. gdy węzły użyte w opisie struktury nie występują w opisie symbolu graficznego).

Użytkownik ma również pewne możliwości w zakresie podawania wartości niektórych współczynników występujących w procedurach obliczeniowych, dotyczących np. obciążenia silników, obciążalności prądowej przewodów, wymaganego momentu rozruchowego czy też doboru zabezpieczeń (tym przypadku wartości współczynników muszą się mieścić w określonych przepisami zakresach).

Należy podkreślić, że przystosowalność oprogramowania musi podlegać pewnym restrykcjom, przede wszystkim w obrębie wymagań wynikających z obowiązujących przepisów. Dla przykładu, użytkownik nie ma możliwości zmiany tych współczynników, których wartości wymagane są przepisami. Wartości tych współczynników zapisane zostały na stałe w kodzie źródłowym oprogramowania. W efekcie, w przypadku zmian w przepisach (normach) zachodzi konieczność modyfikacji kodu źródłowego oprogramowania przez jego autorów. Należy jednak zauważyć, że do zadań użytkownika programu należy śledzenie zmian w przepisach i nie powinien on używać programu, który może być zdezaktualizowany. W opisywanej sytuacji użytkownik powinien zwrócić się do autorów programu o udostępnienie aktualnej wersji.

Negatywnym, ale niemożliwym do uniknięcia efektem przyjętej przez autorów koncepcji jest możliwość świadomego wprowadzenia przez użytkownika błędnych parametrów elementów sieci. Działania takie należy uznać za niedopuszczalne, a ich konsekwencją może być wzrost zagrożeń (np. pożarowego i wybuchowego wskutek braku zadziałania zabezpieczeń) powodowanych pracą błędnie zaprojektowanej sieci oraz straty materialne (obniżenie trwałości lub zniszczenie elementów sieci wskutek przegrzania).

3. Dostosowanie parametrów programu do potrzeb użytkowników

Użytkownicy mogą kontaktować się bezpośrednio z autorami oprogramowania SNN w celu przekazywania uwag odnośnie do działania programu lub propozycji poprawy funkcjonalności. Ich uwagi, szczególnie w pierwszej fazie użytkowania, doprowadziły do wprowadzenia wielu zmian, jeżeli chodzi o usunięcie usterek, sposób obsługi, przystosowalność, funkcjonalność i prezentowa-

nie wyników obliczeń. Pewną trudnością mogą w tym zakresie być różne upodobania użytkowników, uniemożliwiające przystosowanie programu do potrzeb każdego odbiorcy. W niektórych sytuacjach (tam, gdzie to było wykonalne) wprowadzono możliwość opcjonalnego ustawiania parametrów programu w pliku konfiguracyjnym. Duże możliwości, nie zawsze wykorzystywane w pełnym stopniu przez użytkowników, stwarza sposób prezentacji wyników obliczeń – tabele są tworzone w formacie HTML, co znacznie ułatwia tworzenie dokumentacji projektowej (np. wklejanie poszczególnych tabel do edytorów tekstowych lub arkuszy kalkulacyjnych). Do tworzenia dokumentacji HTML wykorzystywany jest szablon (umożliwiający w szerokim zakresie modyfikację), w którym zdefiniowano ogólny układ dokumentacji (w tym wszelkie napisy i nagłówki tabel). Szablon zawiera definicje stylów zastosowanych w dokumentacji, dzięki czemu użytkownik znający zasady języka HTML może modyfikować jej wygląd. Dodatkowo, w pasku stanu okna przeglądarki, ukazują się informacje wyjaśniające przyjęte oznaczenia wielkości używane w tabelach.

Wszystkie symbole graficzne elementów projektowanej sieci definiowane są w sposób wektorowy z wykorzystaniem kilku słów kluczowych reprezentujących podstawowe elementy graficzne (elipsa, linia, prostokąt itp.). Opisy symboli tworzą oddzielny zbiór (katalog) tekstowy. Wektorowy (nie rastrowy) zapis zdefiniowanych symboli sprawia, iż wprowadzony schemat można wydrukować na drukarce (ploterze) w dowolnej skali, bez zmiany jakości wydruku. Można także dokonać eksportu narysowanych schematów projektowanych sieci do formatu dxf obsługiwanego przez programy do obsługi grafiki wektorowej (np. AutoCAD czy CorelDRAW). Zapis wektorowy ułatwia także modyfikację i uzupełnianie katalogu symboli graficznych urządzeń.

Opis symbolu graficznego w formie tekstowej można utworzyć ręcznie, pisząc tekst i stosując zasady opisane w dokumentacji programu SNN. Dla ułatwienia można posłużyć się edytorem symboli, za pomocą którego symbol można rysować się w odpowiednim oknie, wstawiając elementy graficzne oraz zaciski. W trakcie rysowania automatycznie tworzony jest opis symbolu w formie tekstowej.

4. Model numeryczny sieci elektroenergetycznej i algorytm obliczeń

Model numeryczny sieci tworzony jest w oparciu o wprowadzony schemat oraz dane katalogowe. Konfigurację projektowanej sieci przedstawiono w postaci grafu zorientowanego. Węzłami grafu są zaciski (zewnętrzne i wewnętrzne)

urządzeń oraz odbiorników. Łuki grafu odwzorowują gałęzie wewnętrzne poszczególnych urządzeń (zdefiniowane w katalogach) oraz przewody łączące poszczególne urządzenia.

Odwzorowanie numeryczne pierwotne sieci zawiera pełne listy węzłów i łuków. Węzły odwzorowywane są przez rekordy zawierające m.in. następujące pola:

- oznaczenie węzła i jego współrzędne na schemacie,
- typ i nazwę urządzenia,
- napięcie znamionowe i prąd obciążenia,
- dane dotyczące rodzaju pomieszczenia, w którym znajduje się urządzenie.

Rekordy opisujące łuki grafu zawierają m.in. następujące pola:

- oznaczenie węzła początkowego i końcowego,
- impedancję odwzorowywanego urządzenia; w przypadku bezpośredniego połączenia dwóch różnych zacisków urządzeń jest tworzony łuk o zerowej impedancji,
- prąd dopuszczalny długotrwale.

Sieć otwarta jest odwzorowywana grafem typu drzewo, w którym w każdym węźle kończy się jeden łuk (początek i koniec łuku jest związany z kierunkiem przepływu mocy). Odwzorowanie pierwotne sieci promieniowej przekształcane jest w odwzorowanie wtórne w postaci struktury inwersyjnej [Boron, Cholewa, Miśkiewicz, 1997]. Zastosowane w przyjętym modelu numerycznym odwzorowanie wtórne charakteryzuje się tym, że węzeł zasilany ma zawsze wyższy numer od węzła zasilającego (węzeł źródłowy ma numer 1).

W trakcie tworzenia listy węzłów i łuków sprawdzana jest formalna poprawność konfiguracji sieci, w tym:

- występowanie każdego zacisku z listy gałęzi wewnętrznych urządzenia w liście węzłów,
- przyłączenie obydwu końców przewodu do zacisków zewnętrznych urządzeń,
- istnienie drogi między każdym węzłem sieci a węzłem źródłowym.

W przypadku stwierdzenia błędów we wprowadzonej konfiguracji sieci generowany jest odpowiedni komunikat.

Zastosowany algorytm obliczeń obejmuje m.in.:

- sprawdzenie doboru mocy znamionowej transformatorów,
- sprawdzenie doboru kabli i przewodów oponowych ze względu na obciążalność długotrwałą,
- obliczenie poziomu napięć podczas pracy ustalonej oraz podczas rozruchu silników,
- obliczenie pojemności doziemnej sieci,

- sprawdzenie doboru łączników ze względu na zdolność łączeniową i wytrzymałość zwarciovą,
- dobór nastaw zabezpieczeń nadprądowych.

Dla potrzeb obliczeń wszystkie parametry sieci (impedancje, napięcia i prądy) są sprowadzane do poziomu napięcia odniesienia równego 1000 V. Obliczenia są przeprowadzane według przyjętych w projektowaniu sieci elektroenergetycznych zasad uwzględniających normy [PN-G-42042, 1998; PN-G-42070, 2001] i przepisy górnicze [Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa..., 2002].

Algorytm obliczeń zastosowany w programie SNN posiada następujące cechy charakterystyczne:

- obliczone wartości prądów zwarcia zależą od przekładni znamionowej transformatorów (bez uwzględnienia położenia zaczeów) oraz od napięcia znamionowego (a nie roboczego) źródła zasilania,
- w obliczeniach minimalnych prądów zwarciovych uwzględnia się rezystancje kabli i przewodów nagranych do temperatury wynikającej z prądów obciążenia oraz największą impedancję zastępczego źródła zasilania,
- w obliczeniach maksymalnych prądów zwarciovych uwzględnia się rezystancje kabli i przewodów nienagranych prądem obciążenia (temperatura 20°C) oraz najmniejszą impedancję zastępczego źródła zasilania,
- uwzględnia się możliwość dobezpieczania styczników odpowiednimi bezpiecznikami topikowymi; obliczany jest prąd przełomowy (punkt przecięcia charakterystyki czasowo-prądowej wkładki topikowej z charakterystyką czasowo-prądową zabezpieczenia przeciążeniowo-zwarciovego współpracującego ze stycznikiem).

5. Wykorzystanie oprogramowania do analiz o charakterze naukowym

W Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej prowadzone są prace naukowo-badawcze m.in. z zakresu projektowania i optymalizacji układu sieci zasilających maszyny przodkowe. W pracach tych szeroko wykorzystywane jest oprogramowanie SNN. Dostęp do kodu źródłowego umożliwia modyfikację programu dla konkretnego zastosowania, np. wglądu w wyniki obliczeń, które ze względu na swą szczegółowość nie są prezentowane w standardowej wersji programu, czy też zmiany pewnych stałych (współczynników), których wartości zapisane są w kodzie źródłowym. Tematyka prac doty-

czy określenia możliwości zasilania maszyn górniczych, szczególnie dużych mocy, określenia optymalnego usytuowania aparatury elektrycznej (stacji transformatorowych, rozruszników) z uwagi na jakość energii elektrycznej lub straty mocy, czy też analiz związanych z gospodarką mocą bierną. Efektem tych prac są również publikacje w czasopiśmie naukowo-technicznych. Oprogramowanie SNN wykorzystują również studenci realizujący prace dyplomowe na specjalności elektrotechnika i automatyka w górnictwie.

Podsumowanie

Program komputerowy SNN wspomagający projektowanie kopalnianych sieci elektroenergetycznych niskonapięciowych jest stosowany w kopalniach już prawie 20 lat. Ten stosunkowo długi okres użytkowania programu pozwolił na stwierdzenie, że przyjęta koncepcja, umożliwiająca użytkownikowi samodzielne definiowanie nowych elementów projektowanych sieci elektroenergetycznych oraz ich parametrów, okazała się słuszna. Od użytkownika wymaga to jednak szczególnej uwagi i stosowania przyjętych w programie zasad tworzenia katalogów. Stosunkowo wysoki stopień automatyzacji procesu projektowania nie powinien zwalniać użytkowników programu od odpowiedzialności za prawidłowość wprowadzanych danych oraz od analizy wyników, szczególnie wobec założonej przez autorów dużej elastyczności oprogramowania. W kilkunastoletnim okresie użytkowania program ulegał wielokrotnym modyfikacjom wynikającym ze zmian w przepisach, z pojawienia się na rynku i upowszechnienia w kopalniach nowych rozwiązań technicznych (np. silniki dwubiegowe, przewody z dwoma układami żył roboczych) oraz uwag i sugestii użytkowników.

Literatura

- Boron S., Cholewa A., Miśkiewicz K. (1997), *Algorytm komputerowo wspomaganego doboru zabezpieczeń kopalnianych sieci niskonapięciowych*, „Mechanizacja i Automatyka Górnictwa”, nr 6-7, s. 39-43.
- Boron S., Cholewa A., Miśkiewicz K. (2015), *SNN 1.0 – Program wspomagający projektowanie kopalnianych sieci niskonapięciowych – Instrukcja obsługi*, Gliwice.
- PN-G-42042 (1998), *Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej – Zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe – Ogólne wymagania i zasady doboru*.
- PN-G-42070 (2001), *Elektroenergetyka kopalniana – Sieci elektroenergetyczne o napięciu znamionowym powyżej 1 kV zasilające maszyny przodkowe – Wymagania*.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, Dz.U. Nr 139, poz. 1169 oraz z 2006 r. Nr 124, poz. 863.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF POWER NETWORKS IN MINES

Summary: Power networks in underground mines are designed largely on the basis of regulations and standards, taking into account the specific environmental conditions of their work. For this reason, the usefulness of the many available computer programs supporting the design of these networks is limited because the software does not consider the specifics of the mining industry. In the Department of Electrical Engineering and Process Control in Mining of the Silesian University of Technology software SNN was developed for designing low voltage underground networks. The main characteristics of the software has been presented in the paper, as well as the possibility to adapt the program to users' needs, method of network elements mapping, numerical model creation and the calculation algorithm. The experiences of software developers concerning contact with the users and the possibility of using the analysis of a scientific nature has been described

Keywords: computer aided design, power networks in coal mines, SNN software.