

Analiza i ocena programów komputerowych do wspomagania projektowania przemysłowych układów elektroenergetycznych

Streszczenie. W artykule opisano doświadczenia z praktycznego wykorzystania powszechnie dostępnych programów wspomagających proces projektowania systemów zasilania i rozdziału energii w przemysłowych układach elektroenergetycznych. Przeprowadzone badania wskazują na zalety, ale również mankamenty analizowanych programów komputerowych.

Abstract. Article describes the experience of the practical use of widely available software to support the process of designing power supply and power distribution systems in industrial electric power systems. Research has indicated advantages, but also disadvantages of analyzed computer programs. **The experience of the practical use of widely available software to support the process of designing power supply**

Słowa kluczowe: przemysłowe układy elektroenergetyczne, projektowanie, oprogramowanie wspomagające projektowanie

Keywords: industrial electric power systems, designing, supporting software for designing

Wstęp

Przemysłowy układ elektroenergetyczny to bardzo szerokie pojęcie. W niniejszym opracowaniu jako przemysłowy układ elektroenergetyczny (PUEEN) rozumieć będziemy układ sieci zasilającej odbiorniki energii elektrycznej na terenie zakładu przemysłowego, budynków biurowych lub innych obiektów komercyjnych [1]. Stanowią one bardzo różnorodną grupę sieci rozdzielczych wyróżniających się specyficznymi indywidualnymi cechami, takimi jak:

- indywidualna struktura napięć znamionowych zdeteminowana przez specyfikę zasilanego obiektu,
- szczególna topologia i struktura sieci dystrybucyjnej,
- indywidualne wymagania dotyczące doboru aparatury rozdzielczej,
- indywidualne wymagania w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska.

W pełni świadomi różnorodności rozwiązań technicznych możliwych do zastosowania w PUEEN, autorzy niniejszego artykułu ograniczyli swoje rozważania do wybranych zagadnień związanych z projektowaniem PUEEN dla obiektów o mocy przyłączeniowej z przedziału od kilkuset kW do kilkudziesięciu MW, tj. do zasilania obiektów należących do III i II grupy przyłączeniowej [2]. Jednym z celów niniejszego opracowania jest podzielenie się doświadczeniami z przeprowadzonych badań dotyczących analizy dostępnych i popularnych aplikacji komputerowych wspomagających projektowanie i modelowanie układów zasilania i rozdziału energii na przykładzie przemysłowych układów elektroenergetycznych.

Podstawowe schematy strukturalne przemysłowych układów elektroenergetycznych

Proces projektowania PUEEN powinien zapewniać taką strukturę układu zasilania i rozdziału energii by możliwe było osiągnięcie zamierzonych właściwości funkcjonalnych układu [3]. Powinny być one zatem projektowane w sposób zapewniający wymagany poziom podstawowych cech funkcjonalnych, a mianowicie:

- niezawodności ruchowej,
- elastyczności ruchowej
- elastyczności eksploatacyjnej.

Różnorodne struktury PUEEN są tworzone zwykle z wykorzystaniem podstawowych standardów układów zasilania i rozdziału energii w obiektach przemysłowych. Standardowe schematy strukturalne PUEEN są przedstawione w publikacjach i można je podzielić na kilka kategorii, np. [1, 4]:

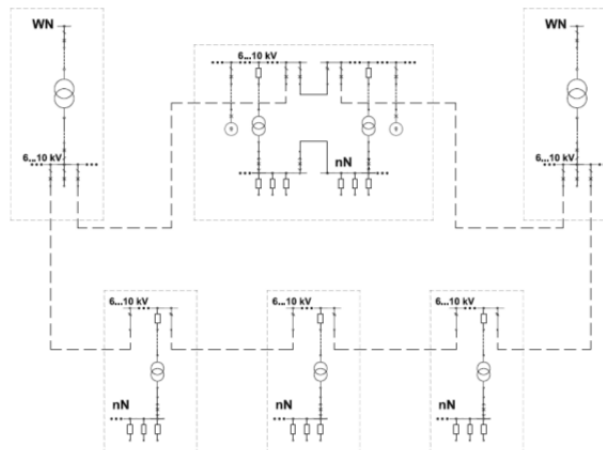
- układ promieniowy otwarty nierezewowany,

- układ dwupromieniowy rezerwowany,
- układ magistralny nierezewowany,
- układ magistralny rezerwowany,
- układ pętlicowy zamknięty.

Zwykle w realnych zastosowaniach występują układy hybrydowe powstające z połączenia wymienionych układów standardowych. Mieszane (hybrydowe) układy zasilania powstają zwykle w wyniku kompromisu pomiędzy nakładami inwestycyjnymi, wymaganiami funkcjonalnymi i technicznymi oraz ograniczeniami urbanistycznymi i formalnymi. Taki sposób postępowania pozwala na wykorzystanie zalet poszczególnych układów, zachowanie prostoty oraz optymalne wykorzystanie wszystkich urządzeń i elementów PUEEN. Układom dystrybucyjnym w zakładach przemysłowych można przypisać kilka ogólnych cech charakterystycznych:

1. Układy elektroenergetyczne o napięciu < 110 kV pracują w układzie otwartym. Powszechnie stosuje się zasadę unikania pracy równoległej galwanicznie połączonych źródeł zasilania. Praca „równoległa” może występować tylko w uzasadnionych przypadkach i po uzgodnieniu z Operatorem Sieci Dystrybucyjnej (OSD).
2. Rezerwowanie zasilania jest realizowane przez automatykę SZR (AZR – wyposażonych w kontrolę synchronizmu źródeł) lub ręcznie.
3. Wyposażenie w aparaturę pozwala na zrealizowanie wymaganych funkcjonalności oraz zapewnia bezpieczną eksploatację i konserwację urządzeń rozdzielczych.

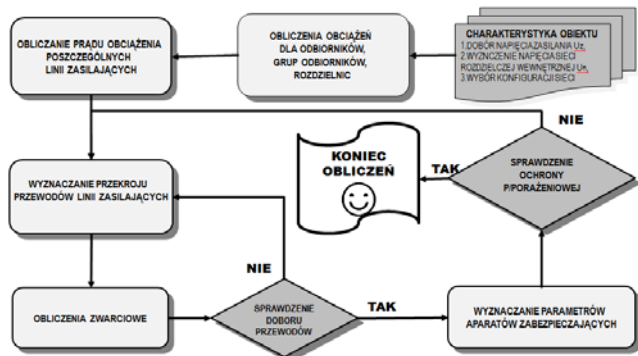
Przykładem takiego układu hybrydowego może być układ przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat strukturalny PUEEN – przykład wykorzystania różnych struktur zasilania

Obliczenia techniczne przemysłowych układów elektroenergetycznych

Niezbędnym elementem procesu projektowania układów elektroenergetycznych są obliczenia techniczne, które pozwalają dobrać poszczególne elementy schematów strukturalnych zgodnie z wymaganiami norm i standardów technicznych obowiązujących w Polsce. Obliczenia techniczne przeprowadza się według wzorów, standardów określonych w normach technicznych dla konkretnej konfiguracji układu, znanych parametrów odbiorników oraz określonych funkcji węzłów sieci. Kolejność postępowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Ogólny algorytm obliczeniowy w procesie doboru urządzeń PUEEN

Obliczenia testowe dla dwóch wariantów układu zasilania

W praktyce projektowej obliczenia techniczne elementów układów elektroenergetycznych są wykonywane z pomocą wybranych programów wspomagających proces projektowy. Programy te mają na celu usprawnienie pracy projektanta w zakresie wykonywania czasochłonnych obliczeń związanych z realizacją algorytmu przedstawionego na rysunku 2.

Obecnie jest dostępnych wiele aplikacji, programów, które mają na celu ułatwienie i usprawnienie pracy projektanta. Są to między innymi programy powszechnie udostępniane przez wiodących producentów urządzeń i technologii w tym obszarze zastosowań [5].

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę wybranych aplikacji w celu zweryfikowania ich funkcjonalności i przydatności w procesie projektowania. Głównym celem badań było przeprowadzenie analizy dostępnych aplikacji pod kątem zgodności algorytmów i wyników obliczeń z wymaganiami standardów i norm technicznych obowiązujących w Polsce.

Testy przeprowadzono dla następujących programów:

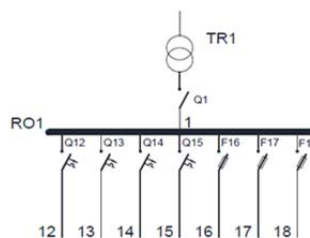
- Ecodial Advanced Calculation, wersja 4.25 (Schneider Electric),
- Simaris Design, wersja 7.0.0 (Siemens),
- Pająk, wersja 2.10 (Eaton Electric),
- XLPro3 Calcul (XLPRO), wersja beta 3.0.06. (Legrand).

Obliczenia zostały wykonane na przykładach dwóch uproszczonych układów zasilania i rozdziału energii przedstawionych na rysunku 3 (układ zasilania promieniowego) oraz na rysunku 4 (zasilanie magistralne).

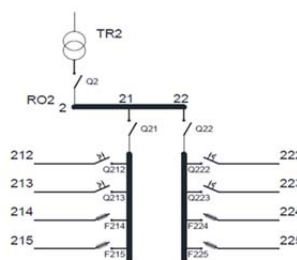
Wybór układów rozdziału energii został zdeterminowany ograniczeniami jakie wynikają ze wstępnej oceny możliwości obliczeniowych analizowanych programów, która wykazała, że programy te są dedykowane do układów zasilania i rozdziału energii nn. Możliwości modelowania i obliczeń układów SN są bardzo ograniczone i w praktycznym działaniu nieprzydatne.

Do obliczeń przyjęto takie same dane wyjściowe dla wszystkich testów:

1. Układy są zasilane z sieci SN 15 kV przez transformatory TR1 i TR2 o mocy znamionowej 250 kVA każdy.
2. Z rozdzielnic oddziałowej RO1 są zasilane odbiorniki o parametrach przedstawionych w tabeli 1.
3. Z rozdzielnic oddziałowej RO2 są zasilane odbiorniki o parametrach przedstawionych w tabeli 2.



Rys. 3. Schemat PUEEN do obliczeń testowych. Przykład nr 1 – zasilanie promieniowe



Rys. 4. Schemat PUEEN do obliczeń testowych. Przykład nr 2 – zasilanie magistralne

Tabela 1. Założenia projektowe dla PUEEN - Przykład 1

ROZDZIELNICA ODDZIAŁOWA RO1								
Numer obwodu	11	12	13	14	15	16	17	18
Moc obciążenia P_n [kW]	52	12	7,5	5,5	2	12	7,5	5,5
Wsp. wykorzystania k_u		0,9	0,85	0,7	0,5	0,9	0,85	0,7
Wsp. jednoczesności k_s	0,75							
Wsp. mocy $\cos\varphi$		0,65	0,7	0,75	0,9	0,65	0,7	0,75
$P_i = k_u \cdot P_n$	43,5	10,8	6,38	3,85	1	10,8	6,38	3,85
$\sum P_i \cdot k_s$	32,29							
Długość obwodu L [m]	5	10	8	5,5	15	10	8	5,5

Tabela 2. Założenia projektowe dla PUEEN - Przykład 2

ROZDZIELNICA ODDZIAŁOWA RO2											
Numer obwodu	2	21	212	213	214	215	22	222	223	224	225
Moc obc. P_n [kW]	134	79	22	17,2	22	17,5	55	10	17,5	10	17,5
k_u			0,9	0,85	0,9	0,85		0,9	0,85	0,9	0,85
k_s	0,9	0,8					0,8				
$\cos\varphi$			0,65	0,7	0,65	0,7		0,9	0,95	0,9	0,95
$P_i = k_u \cdot P_n$			19,8	14,9	19,8	14,9		9	14,9	9	14,9
$\sum P_i$		69,4					47,8				
$\sum P_i \cdot k_s$		55,5					38,2				
$\sum P_i \cdot k_s$	84,3										
L [m]		40	2	2	2	2	40	5	5	5	5

Dla tak przyjętych założeń zostały przeprowadzone obliczenia techniczne metodą tradycyjną, zgodnie z wymaganiami polskich norm i standardów technicznych [6, 7] oraz obliczenia z wykorzystaniem programów wspomagających projektowanie. Wyniki poszczególnych obliczeń i parametry dobranych urządzeń i elementów analizowanych układów zostały zestawione w tabelach 3-7.

Obliczenia prądu roboczego I_B stanowią pierwszy krok przeprowadzonej analizy i stanowią podstawę do dalszych działań. Dla tego etapu różnice są spowodowane sposobem uwzględniania współczynników jednoczesności, zarówno w obliczeniach technicznych, jak przez programy Ecodial i Pająk. Obliczenia wykonane przez programy Si-

maris i XLPro są przeprowadzone dla mocy znamionowych odbiorników, stąd wyższe wartości.

W pierwszej fazie badań przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem programów komputerowych w trybie w pełni automatycznym. Zostały wprowadzone wszystkie potrzebne dane wyjściowe, na podstawie założeń przedstawionych powyżej, następnie programy przeprowadziły automatyczny proces obliczeń technicznych i doboru poszczególnych elementów układu. Wyniki obliczeń, przedstawione w tabelach 3-7, w tym przypadku zależały od algorytmów wykorzystywanych przez poszczególne aplikacje oraz danych zaimplementowanych w oprogramowaniu.

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń prądu roboczego

Obliczenia prądów obciążenia I_B poszczególnych linii zasilających					
Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJAŁ	SIMARIS	XLPRO
RO1, $I_B = 364$					
1	67,97	361*)	67,83	67,8	67,9
12	23,98	24	23,94	26,6	26,7
13	13,16	13,1	13,18	15,5	15,5
14	7,41	7,41	7,42	10,6	10,6
15	1,6	1,36	1,6	3,21	3,3
16	23,98	24	23,94	26,6	26,7
17	13,16	13,1	13,18	15,5	15,5
18	7,41	7,41	7,42	10,6	10,6
RO2, $I_B = 364$					
2	152,29	361*)		157	155,9
21	118,78	119		119	119,4
212	44,02	44	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	48,9	48,9
213	30,72	30,7		36,1	36,1
214	44,02	44		48,9	48,9
215	30,72	30,7		36,1	36,1
22	59,68	60,5		73,9	58,6
222	14,45	14,4		16	16,1
223	22,63	22,6		26,6	26,6
224	14,45	16		16	15,2
225	22,63	22,6		26,6	26,6

*) Metodyka obliczeń stosowana w oprogramowaniu ECODIAL uwzględnia „dobre praktyki projektowania” w myśl których, pola transformatorowe należy projektować z uwzględnieniem zdolności przesyłowej transformatorów.

Tabela 4. Wyniki doboru prądu znamionowego aparatów zabezpieczających - I_N [A]

Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJAŁ	SIMARIS	XLPRO
RO1					
1	400	400	400	400	320
12	32	25	25	32	32
13	20	16	16	20	16
14	10	8	8	13	16
15	6	2	6	6	4
16	32	25	25	32	32
17	20	16	16	2	16
18	10	10	8	16	16
RO2					
2	400	400		400	320
21	160	125		125	125
212	63	50	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	63	50
213	40	32		40	40
214	63	50		63	50
215	40	32		40	40
22	80	63		63	80
222	20	16		20	20
223	32	25		32	32
224	20	20		20	16
225	32	25		32	32

Analiza wyników obliczeń przedstawionych w tabelach 3-7 wskazuje, że otrzymane rezultaty różnią się znacznie i bezkrytyczne przyjmowanie wyników obliczeń automatycznych może prowadzić do błędnych rozstrzygnięć projektowych. Dla ujednolicenia procedury obliczeń, został przeprowadzony dodatkowy test. Dla układu przedstawionego na rysunku 3 (z rozdzielnicą oddziałową RO1 – Przykład 1), wykonano obliczenia prądów zwarciovych, w trybie manualnym – „konwersacyjnym” (opcja badanych programów).

Zaimplementowano układ, w którym na podstawie obliczeń technicznych wprowadzono podstawowe parametry projektowanych urządzeń. Następnie w trybie „konwersa-

cyjnym” przeprowadzono obliczenia prądu zwarcia trójfazowego I_k dla identycznych układów. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 5. Wyniki doboru przekrojów linii zasilających [mm²]

Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJAŁ	SIMARIS	XLPRO
RO1					
1	4x185,0	4x150+95,0	4x185,0	4x240,0	4x150,0
12	5x10,0	5x6,0	5x10,0	5x10,0	5x10,0
13	5x4,0	5x2,5	5x4,0	5x4,0	5x2,5
14	5x2,5	5x1,5	5x2,5	5x2,5	5x2,5
15	5x2,5	5x1,5	5x2,5	5x2,5	5x2,5
16	5x10,0	5x6,0	5x10,0	5x10,0	5x10,0
17	5x4,0	5x4,0	5x4,0	5x4,0	5x2,5
18	5x2,5	5x2,5	5x2,5	5x2,5	5x2,5
RO2					
2	4x185,0	4x150+95,0		4x240,0	4x150,0
21	5x70,0	4x70,0+35		5x50,0	5x70,0
212	5x25,0	5x16,0	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	5x16,0	5x16,0
213	5x10,0	5x10,0		5x6,0	5x10,0
214	5x25,0	4x25,0+16,0		5x16,0	5x16,0
215	5x16,0	5x6,0		5x10,0	5x10,0
22	5x35,0	4x25,0+16,0		5x16,0	5x25
222	5x4,0	5x2,5		5x2,5	5x4,0
223	5x10,0	5x6,0		5x4,0	5x10,0
224	5x6,0	5x4,0		5x2,5	5x4,0
225	5x10,0	5x6,0		5x6,0	5x10,0

Tabela 6. Zestawienie wartości spadku napięcia, ΔU [%]

Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJAŁ	SIMARIS	XLPRO
RO1					
1	0,013	0,13	0,02	0,023	0,02
12	0,128	0,386	0,41	0,293	0,19
13	0,149	0,416	0,5	0,293	0,36
14	0,102	0,327	0,22	0,135	0,19
15	0,074	0,269	0,16	0,102	0,19
16	0,128	0,386	0,41	0,266	0,19
17	0,149	0,31	0,31	0,293	0,36
18	0,102	0,249	0,22	0,135	0,19
RO2					
2	0,049	0,135		0,052	0,06
21	0,093	0,206		0,151	0,13
212	0,111	1,05	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	0,471	1,39
213	0,127	1,06		0,664	1,4
214	0,111	1,04		0,747	1,39
215	0,107	1,09		0,801	1,4
22	0,110	0,248		0,251	0,17
222	0,236	1,51		0,671	1,23
223	0,193	1,43		0,797	1,18
224	0,194	1,43		0,863	1,23
225	0,193	1,43		0,835	1,18

Rozbieżności w wynikach obliczeń nie pozwalają uznać ich za jednoznacznie prawidłowe. Opisane wyżej rozbieżności powstają na skutek różnych algorytmów obliczeń zastosowanych w poszczególnych aplikacjach. Zdaniem autorów przyczyna rozbieżności leży w tym, że analizowane programy, są opracowywane przez koncerny z wykorzystaniem bazy normatywnej z rodzimych krajów.

W programie Ecodial oparto się na standardach CENELEC TR 50480 [10, 11]. Dodatkowym ograniczeniem jest zastosowanie baz danych elementów i aparatów dedykowanych dla danego producenta, co powoduje dalsze rozbieżności w uzyskiwanych wynikach obliczeń.

Projektowane układy elektroenergetyczne muszą spełniać wymagania formalno-prawne zapewniające bezpieczeństwo budowy i eksploatacji instalacji elektroenergetycznych obowiązujących na terytorium danego kraju. Wymagania dla instalacji elektrycznych niskiego napięcia zawiera wieloarkuszowa norma PN-IEC 60364 oraz szereg ustaw i rozporządzeń odpowiednich organów państwowych.

Tabela 7. Wyniki obliczeń prądu zwarcia trójfazowego, I_k [kA]

Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJĄK	SIMARIS	XLPRO
RO1					
1	6,39	5,88	5,85	9,53	8,71
12	5,3	4,29	3,25	6,74	6,37
13	4,26	3,12	1,93	4,83	3,42
14	4,08	2,86	2,57	4,56	4,42
15	2,06	1,27	1,13	2,07	2,05
16	5,3	4,29	3,25	6,74	6,37
17	4,26	4,0	2,81	4,83	3,42
18	4,08	3,84	2,57	4,56	4,42
RO2					
2	6,38	5,88	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	9,53	8,71
21	6,25	5,78		9,17	8,48
212	6,15	5,68		7,78	8,2
213	6,06	5,62		6,62	8,04
214	6,16	5,71		6,45	8,2
215	6,06	5,52		5,79	8,04
22	6,2	5,7		8,62	8,23
222	4,84	3,83		4,05	5,52
223	4,89	4,9		4,65	7,04
224	4,58	4,5		3,58	5,52
225	4,89	4,9		4,52	7,04

Tabela 8. Zestawienie wartości prądu zwarcia trójfazowego, I_k [kA] dla ujednoczonego PUEEN wg przykładu 1

Nr obwodu	OBL.TECH.	ECODIAL	PAJĄK	SIMARIS	XLPRO
RO1					
1	6,39	5,88	5,85	9,53	8,71
12	5,3	4,29	3,25	6,74	6,37
13	4,26	3,12	1,93	4,83	3,42
14	4,08	2,86	2,57	4,56	4,42
15	2,06	1,27	1,13	2,07	2,05
16	5,3	4,29	3,25	6,74	6,37
17	4,26	4,0	2,81	4,83	3,42
18	4,08	3,84	2,57	4,56	4,42
RO2					
2	6,38	5,88	Brak możliwości obliczeń dla układu magistralnego	9,53	8,71
21	6,25	5,78		9,17	8,48
212	6,15	5,68		7,78	8,2
213	6,06	5,62		6,62	8,04
214	6,16	5,71		6,45	8,2
215	6,06	5,52		5,79	8,04
22	6,2	5,7		8,62	8,23
222	4,84	3,83		4,05	5,52
223	4,89	4,9		4,65	7,04
224	4,58	4,5		3,58	5,52
225	4,89	4,9		4,52	7,04

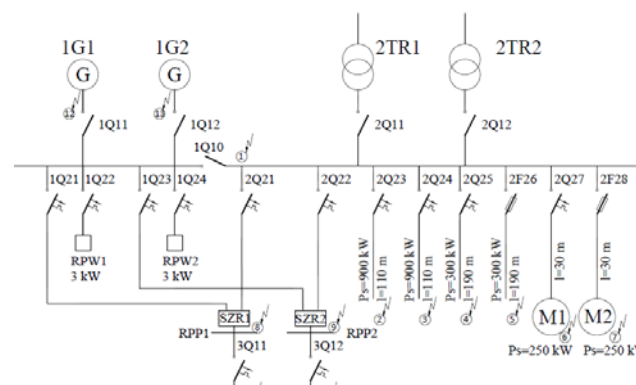
Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że występujące różnice mogą utrudnić jednoznacznie ocenę prawidłowości doboru urządzeń. W szczególności wątpliwości występują w sytuacji, gdy uzyskane wyniki obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem badanych programów „lokują się w pobliżu” wartości kryterialnych określanych przez normy i standardy techniczne.

Rozpatrywane aplikacje oprócz opisanych wyżej mankamentów mają istotną wartość. Mogą służyć usprawnieniu pracy projektanta, na etapie analizy konfiguracji, pozwalają na szybkie i sprawne obliczenia dla różnych wariantów pracy układu zasilania. Ostateczne wyniki należy wnikliwie przeanalizować i dokonać ostatecznych obliczeń zgodnie ze standardami i normami technicznymi.

Obliczenia testowe dla PUEEN z wewnętrznymi źródłami prądu zwarcia

W sieciach przemysłowych bardzo często odbiornikami energii elektrycznej są silniki asynchroniczne o dużej mocy znamionowej lub są w nich zainstalowane generatory współpracujące z siecią. Ma to istotne znaczenie dla obliczeń parametrów zwarciovych danego układu, ze względu na to, że generatory i silniki asynchroniczne średniego i

niskiego napięcia są dodatkowymi źródłami prądu zwarciovego [6]. Przeprowadzone zostały dodatkowe obliczenia dla układu elektroenergetycznego przedstawionego na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat PUEEN do testów i obliczeń wpływu wewnętrznych źródeł prądu zwarcia

Dla układu przedstawionego na rysunku 5 pojawiły się trudności w modelowaniu pracy równoległej generatorów i transformatorów w układzie elektroenergetycznym.

W testowanych aplikacjach nie ma możliwości zamodelowania takiego układu i konieczne jest wprowadzenie pewnych uproszczeń. Problem z modelowaniem pracy równoległej wymaga podzielenia układu na warianty pracy i zastosowania zasady superpozycji [6]. Przeprowadzono obliczenia dla stanów pracy układu przedstawionych w tabeli 9.

Tabela 9. Stany łączników odpowiadające poszczególnym wariantom pracy układu przedstawionego na rys. 5

WARIANT PRACY	1Q11	1Q12	1Q10	2Q11	2Q12
W1	0	0	0	1	0
W2	0	0	0	1	1
W3	0	1	1	0	0
W4	1	1	1	0	0

1 - Wyłącznik załączony, 0 - Wyłącznik wyłączony

Tabela 10. Wyniki obliczeń prądu zwarcia trójfazowego I_k [kA] w funkcji mocy transformatorów i mocy zwarcioviej systemu zasilającego

Moc transformatorów [kVA]	Moc zwarciovaja systemu zasilającego [MVA]					
		160	200	250		
	1600		38,70	39,69	40,53	OBL.TECH
		32,70	33,70	34,50	ECODIAL	
		32,86	33,80	34,60	XLPRO 3	
2000			44,95	46,36	47,56	OBL.TECH
			39,40	40,8	42,00	ECODIAL
			39,61	41,00	42,17	XLPRO 3
2500		51,94	53,90	55,59	OBL.TECH	
		47,20	49,20	50,90	ECODIAL	
		47,41	49,41	51,13	XLPRO 3	

Zakładając stałą konfigurację odbiorników w układzie przedstawionym na rysunku 5, przeprowadzono obliczenia i analizę układu badając wpływ zmian parametrów elementów zasilających. Zmieniając moc znamionową transformatora zasilającego $S_n = \{1600; 2000; 2500\}$ kVA oraz moc zwarciovą systemu elektroenergetycznego $S''_{kQ} = \{160; 200; 250\}$ MVA przeprowadzono obliczenia dla wariantów pracy W1-W4. Wyniki obliczeń przedstawione w tabeli 10 i 11 pokazują jakie zmiany i zagrożenia generuje układ z równoległą pracą transformatorów oraz jaki wpływ na dobór parametrów zwarciovych aparatów mają lokalne generatory prądowórcze. Wyniki obliczeń stanowią wartościowy materiał do analizy i wyboru parametrów układu zasilania projektowanego PUEEN.

Wyniki obliczeń prądu zwarciovego na szynach zbiorczych (p. 1 wg rysunku 5) w zależności od zmian parametrów transformatora i mocy zwarcioviej systemu elektroenergetycznego

nergetycznego przedstawiono w tabeli 10. W tabeli 11 przedstawiono zestawienie wybranych wyników obliczeń dla wariantów pracy W1-W4. Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów układu zasilania: $S_{NT} = 2500$ kVA, $S''_{kQ} = 200$ MVA.

Tabela 11. Wyniki obliczeń prądu zwarcia I_k [kA] dla wariantu W1-W4

	WARIANT PRACY WG TABELI 9				
	W1	W2	W3	W4	
1	53,90	93,87	17,50	28,80	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	49,20	84,00	10,60	21,10	
	49,41	84,13	5,29	10,59	
2	40,65	55,10	13,40	17,10	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	35,90	50,60	9,90	18,60	
	38,30	56,11	5,18	10,11	
3	40,65	55,10	13,40	17,10	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	35,90	50,60	9,90	18,60	
	38,30	56,11	5,18	10,11	
4	33,32	40,65	11,80	13,90	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	29,40	38,10	9,50	17,00	
	32,68	44,58	5,09	9,78	
5	33,32	40,65	11,80	13,90	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	29,40	38,10	9,50	17,00	
	32,68	44,58	5,09	9,78	
6	34,78	45,21	15,90	23,50	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	31,40	42,10	9,60	17,40	
	28,79	35,42	5,00	9,43	
7	34,78	45,21	15,90	23,50	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	31,40	42,10	9,60	17,40	
	28,79	35,42	5,00	9,43	
8	48,64	77,29	17,20	27,70	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	43,30	66,80	10,40	20,30	
	49,41	84,13	5,29	10,59	
9	48,64	45,21	17,20	27,70	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	43,30	42,10	10,40	20,30	
	49,41	35,42	5,29	10,59	
10	44,02	64,68	16,90	26,60	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	37,40	52,30	10,20	19,50	
	43,06	66,98	5,25	10,37	
11	44,02	64,68	16,90	26,60	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	37,40	52,30	10,20	19,50	
	43,06	66,98	5,25	10,37	
12	-	-	12,20	12,20	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	-	-	10,58	10,58	
	-	-	5,30	5,30	
13	-	-	-	12,20	OBL.TECH. ECODIAL XLPRO3
	-	-	-	10,58	
	-	-	-	5,30	

W tabeli 11 można zaobserwować konsekwencje zastosowania układu zasilania z transformatorami pracującymi równolegle oraz wpływ generatorów na wartość prądów zwarcia w PUEN.

Ogólna ocena badanych programów wspomagających projektowanie przemysłowych układów elektroenergetycznych

Programy wspomagające proces projektowania pozwalają na przeprowadzanie sprawnej i szybkiej analizy przy projektowaniu układu zasilania. Umożliwiają szybkie uzyskanie wyników dla zakładanych różnych wariantów pracy, różnych warunków zasilania i różnych rozwiązań konfiguracji sieci. Należy pamiętać, że niektóre z nich generują wyniki znacząco odbiegające od wyników uzyskiwanych z obliczeń tradycyjnych. Wymaga to od projektanta wiedzy

i kreatywnego myślenia. Ostateczne wyniki należy wnikliwie przeanalizować i ocenić zgodność z wymaganiami formalnymi. Analiza PUEEN przeprowadzona za pomocą programów komputerowych powinna być pomocna, natomiast nie decydująca.

Tabela 12. Zestawienie parametrów i funkcji analizowanych programów

Funkcja / parametr	Ecodial	Pajak	Simaris	XLPr0.	
Obliczenia dla typów sieci	TN-S, TN-C	TAK	TAK	TAK	TAK
	TT	TAK	TAK	TAK	TAK
	IT	TAK	TAK	TAK	TAK
Tryby obliczeń	Automat.	TAK	TAK	TAK	TAK
	manualny	TAK	TAK	TAK	TAK
Standardy obliczeń	I_b	CENELEC TR50480	PN-IEC 60364-5-523	IEC 60364-5-52	CENELEC R064-003
	I_n	CENELEC TR50480	PN-IEC 60364-5-523	IEC 60364-5-52	CENELEC R064-003
	I_{z1}, I_{dd}	CENELEC TR50480	PN-IEC 60364-5-523	IEC 60364-5-52	IEC 60364-5-52
	I''_k, I_p	CENELEC TR50480	PN-IEC 60909-0		UTEC 15-105
Źródła zasilania	Transformator SN/nn	TAK	TAK	TAK	TAK
	Generator	TAK	TAK	TAK	TAK
		TAK	TAK	TAK	TAK
	Sieć nn	TAK	TAK	TAK	TAK
	UPS	NIE	NIE	TAK	TAK
Ogniwo fotowolt.	NIE	NIE	NIE	TAK	
Typy odbiorów	Odbiór ogólny	TAK	TAK	TAK	TAK
	Oświetlenie	TAK	NIE	NIE	TAK
	Gniazda	TAK	NIE	TAK	TAK
	Silnik	TAK	TAK	TAK	TAK
	Obciążenie rezystancyjne	NIE	NIE	NIE	TAK
	Urządzenia oddym.	NIE	NIE	NIE	TAK
	Ładowanie pojazdów	NIE	NIE	TAK	TAK
Obliczenia dla układów sieci	Prom.	TAK	TAK	TAK	TAK
	Magistr.	TAK	NIE	TAK	TAK
Współpraca zabezpieczeń	Selekt. zab.	TAK	TAK	TAK	TAK
	Kaskad. zab.	TAK	TAK	NIE	NIE
Ochrona p. porażeniowa	Automat.	TAK	TAK	TAK	TAK
	Manualne	NIE	TAK	NIE	TAK
Napięcie układu	SN	NIE	NIE	NIE	NIE
	nN	Do 1000 V	Do 1000 V	Do 1000 V	Do 1000 V
Częstotliwość sieci	50 HZ	TAK	TAK	TAK	TAK
	60 Hz	TAK	NIE	TAK	NIE
Raport obliczeń		TAK	TAK	TAK	TAK
Wyznaczenie dop. spadku napięcia	Dla całego układu	TAK	TAK	TAK	TAK
	Dla fragment.	TAK	TAK	NIE	NIE
Współczynniki jedn.	Automat, wg IEC 60439-1	TAK	NIE	NIE	NIE
	Manualnie	TAK	TAK	TAK	TAK
Eksport schematu do innych formatów	DWG/DXF	TAK	TAK	TAK	TAK
	PDF	NIE	NIE	TAK	NIE
Eksport raportu		TAK	TAK	TAK	TAK
Funkcje dodatkowe		Możliwość ustawienia maks. spadku napięcia		Możliwość określenia klasy odporności ogniowej przewodów	Ustawienie min. Przekr. dla $I_b = 10$ A, 15 A, 20 A, 25 A, 32 A
					Ustaw. gran. wartości przekr. żyły Al

W tabeli 12 przedstawiono zestawienie podstawowych właściwości testowanych programów wspomagających pracę projektanta. Analiza poszczególnych funkcjonalności pozwala na ocenę przydatności testowanych aplikacji w procesie projektowania.

Podsumowanie

1. Projektowane układy elektroenergetyczne muszą spełniać wymagania formalno-prawne zapewniające bezpieczeństwo budowy i eksploatacji PUEEN. Wymagania dla układów zasilania oraz instalacji elektrycznych niskiego napięcia zawierają obligatoryjne normy oraz szereg ustaw i rozporządzeń odpowiednich organów władzy, takich jak np. ustawa Prawo Energetyczne, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
2. Analizowane programy komputerowe wspomagające projektowanie mają usprawniać pracę projektanta. Pozwalają na szybkie wykonanie szeregu obliczeń dla różnych wariantów układu zasilania i rozdziału energii. Zasadniczym wymaganiem jest wykonywanie obliczeń zgodnie z obowiązującymi standardami, według wytycznych zawartych w odpowiednich normach.
3. Analizowane programy komputerowe nie są wolne od ograniczeń, do których można zaliczyć:
 - brak możliwości modelowania i obliczeń dla PUEEN średniego napięcia,
 - ograniczone możliwości modelowania złożonych konfiguracji PUEEN,
 - brak możliwości bezpośredniego modelowania równoległej współpracy różnych źródeł zasilania.
4. Programy wspomagające projektowanie pozwalają oszacować interesujące projektanta wielkości, ułatwiają szybkie przeliczenie konfiguracji układu, jednak niektóre z nich generują wyniki znacząco odbiegające od wyników uzyskiwanych z obliczeń tradycyjnych.
5. Programy ułatwiają wykonywanie kolejnych serii obliczeń dla zmienionej konfiguracji układu albo po zmianie urządzeń zabezpieczających lub parametrów zasilanych odbiorników, co ułatwia działania zmierzające do osiągnięcia optymalnych rozwiązań projektowych. Wymagają one jednak od projektanta wiedzy oraz kreatywnego myślenia. Ostateczne wyniki należy wnikliwie przeanalizować i ocenić zgodność z wymaganiami formalnymi.
6. Analiza przeprowadzona za pomocą programów komputerowych może tylko pomóc w ostatecznym doborze, natomiast nie powinna być decydująca.
7. Doceniając znaczenie dobrych „narzędzi” wspomagających pracę projektantów z uwagą należy obserwować rozwój kolejnych wersji analizowanych aplikacji oraz kreować potrzebę tworzenia nowych aplikacji rozwiązujących istotne problemy procedur projektowych. Zdaniem autorów uwagę powinno się zwrócić w kierunku programów umożliwiających modelowanie sieci śred-

niego napięcia oraz uwzględniających pracę równoległą źródeł zasilania, w szczególności pracę równoległą generatorów awaryjnych oraz źródeł energetyki rozproszonej.

Autorzy: dr inż. Zygmunt Pawełkiewicz, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: zygmunt.pawelkiewicz@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Beata Zarzycka-Rojek, Epstein Sp. z o.o., ul. Wołoska 9 a, 02-583 Warszawa, e-mail: b.zarzycka.rojek@op.pl; mgr inż. Łukasz Michalski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: michalsl@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Marzecki J., Sieci elektroenergetyczne w obiektach przemysłowych - wybrane zagadnienia, Politechnika Warszawska, ISBN: 978-83-7814-443-4, 2015 r.
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z dnia 15.06.2002 nr 75 z późniejszymi zmianami)
- [3] Dołęga W., *Stacje elektroenergetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007
- [4] Kujaszczuk Sz., Mińczuk A., Pasternakiewicz J., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*, tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994
- [5] Oprogramowanie wspomagające projektowanie – Źródło strony www:
 - Oprogramowanie EcodialAdvanceCalculation Help
 - Oprogramowanie Cenelec TR 50480
 - Oprogramowanie Pająk 2.10 Podręcznik użytkownika
 - Oprogramowanie xSpider 2.10 Reference Manual
 - Oprogramowanie Simaris design tutorial
 - Oprogramowanie Simaris design Technical information
 - Oprogramowanie Simaris design Technical Manual
 - Oprogramowanie Simaris design Help
 - Oprogramowanie XI Pro3 Calcul User Manual
- [6] PN – EN 60909-0 Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0: Obliczanie prądów.
- [7] PN - IEC 60364-5-523 Instalacje elektryczne w obiektach. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Obciążalność prądowa długotrwała przewodów.
- [8] Wiatr J., Boczkowski A., Orzechowski M.: *Zeszyty dla elektryków – nr 8 – Ochrona przeciwporażeniowa oraz dobór przewodów i ich zabezpieczeń w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia*, Dom Wydawniczy Medium, Warszawa 2010
- [9] Marzecki J.: Metody ekonomiczne stosowane do analizy i optymalizacji sieci rozdzielczych, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 82 NR 9/2006
- [10] UTE C 15-105 Guide pratique determination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection. Methodes pratiques.
- [11] CEI - IEC 60364-1 Electrical installations of buildings – Part 1.
- [12] IEC 60364-3 Electrical installations of buildings. Part 3 Assessment of general characteristics.
- [13] IEC TR 60909-1 Technical report. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 1: factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0.