

C.1. Modele łączników elektronicznych

Stany dynamiczne związane z przełączeniami w cyfrowym modelu sieci stanowią duże wyzwanie dla twórców odpowiednich algorytmów modelowania, ponieważ zbiegają się tu przeciwstawne wymagania: z jednej strony powinny one w prosty sposób odwzorowywać zachowanie się tych elementów, ograniczając się do dwóch stanów łącznika, a z drugiej - nie mogą być one źródłem niestabilności numerycznej, objawiającej się w występowaniu niekontrolowanych stanów przejściowych. Pożądane się także, aby zmiana stanu łącznika nie wymagała zmiany długości kroku symulacji lub innej głębokiej reorganizacji procesu obliczeniowego. Tymczasem, nawet pobieżna analiza procesów łączeniowych w elementach elektronicznych uświadamia istnienie bardzo złożonych, krótkotrwałych stanów energetycznych, których przedstawienie w postaci modelu matematycznego prowadzi do złożonych zależności, a ich uwzględnienie łączy się z niewspółmierną z powyższymi oczekiwaniami rozbudową podstawowego algorytmu modelowania sieci elektrycznej. Poszukiwane są, więc algorytmy, które w podstawowy sposób odwzorowują konsekwencje zmiany położenia łączników elektronicznych, zachowując także poprawne odtworzenie stanów dynamicznych.

Po długim etapie prób i wielu nieudanych propozycjach, w programie ATP-EMTP, został zaproponowany – jak się wydaje – skuteczny sposób rozwiązania tego problemu, który nosi nazwę mechanizmu *Gifu*¹. Jest on inicjowany przez wybór odpowiedniej opcji w parametrach dwóch, spośród dostępnych w programie modeli łączników: tyrystora oraz sterowanego łącznika. Pełny ich wykaz zawiera Tabela C.2.1. Są tam wymienione trzy grupy modeli łączników elektronicznych, oznaczone, jako *Type-11*, *Type-12* oraz *Type-13*. Ponadto, w edytorze ATPDraw utworzono cztery dodatkowe łączniki, które są uzyskane przez odpowiednie połączenie dostępnych w programie elementów nieliniowych. Występują one pod ogólną nazwą *DIODEN*. Modele te odtwarzają funkcje większości elementów stosowanych w energoelektronice. Ich ogólna charakterystyka jest podana w Tabeli C.1.









Można go prześledzić na przykładzie sieci z rys. C.1² (wszystkie pliki rozwiązyanych przykładów są dostępne w kartotece *przykład_C9*). Znajdują się tam trzy źródła napięcia stałego oraz trzy łączniki w postaci diod łączących węzły: $N2 - N3$ i $N2 - N4$ (są to łączniki *TYPE 11*), a także starowany przez TACS (MODELS) łącznik *TYPE 13*. Ten ostatni pełni zazwyczaj funkcję tyrystora:

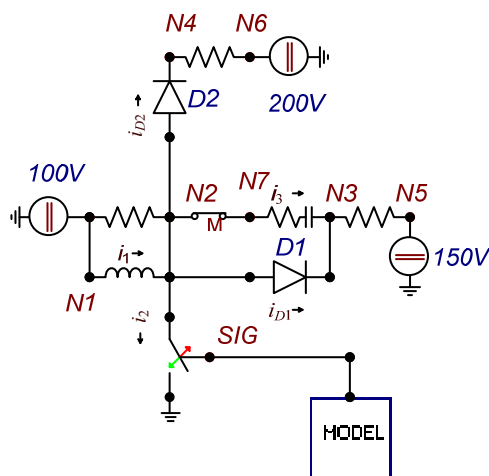
¹ Dyskusję na ten temat można znaleźć na liście dyskusyjnej ATP-EMTP: mailinglist@emtp.org, w uwagach: *W. Scott Meyer and Tsu-huei Liu, 16 December 2014 (Part I) oraz 31 December 2014 (Part II)*.

² Przykład ten jest utworzony na bazie przykładu 8 z pliku *DCN17.dat* dostępnego w zbiorze *BENCHMARK* na dysku instalacyjnym programu ATP-EMTP.

jego położenie jest sterowane za pomocą sygnału sterującego bramką (sygnał *SIG*). Łącznik *TYPE 13* umożliwia wprowadzanie mechanizmu *Gifu* (rys. C.2).

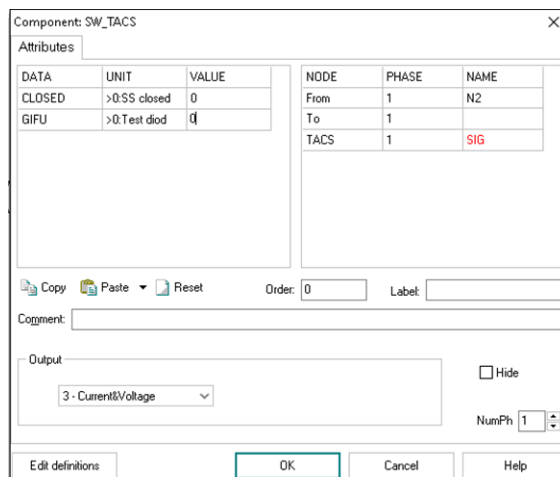
Tabela C.1. Rodzaje modeli łączników elektronicznych w ATPDraw.

Rodzaj	Nazwa/symbol	Parametry	Uwagi
TYPE-11	Dioda 	Vig [V] Ihold [A] Tdeion [s] CLOSED	Zaczyna przewodzić przy $u > Vig$; wyłącza się gdy $i < Ihold$; zaczyna ponownie przewodzić, gdy $u > Vig$ przez czas Tdeion. CLOSED > 0 – zamknięta w początkowym stanie ustalonym.
	Tyrystor 	Vig [V] Ihold [A] Tdeion [s] CLOSED GIFU	Łącznik sterowany sygnałem TACS lub MODELS. Parametry, jak w diodzie; ponadto: GIFU > 0 – uruchomiony zostaje algorytm GIFU.
	DIODEN (ideal) 	Vig [V] Ihold [A] Rf [Ω] Tdeion [s] CLOSED	Parametry, jak w diodzie; ponadto: Rf – szeregowo włączona rezystancja.
TYPE-12	Triak 	Vig [V] Ihold [A] CLOSED	Triak sterowany sygnałami S (spark) oraz C (clamp). Parametry, jak w diodzie (bez Tdeion).
TYPE-13	Łącznik sterowany z TACS (MODELS) 	CLOSED GIFU	Łącznik bezwzględnie sterowany sygnałem TACS lub MODELS; CLOSED > 0 – zamknięta w początkowym stanie ustalonym; GIFU > 0 – uruchomiony zostaje algorytm GIFU.
TYPE-92	DIODEN (two segments) 	Vig [V] Rf [Ω] CLOSED Rb [Ω]	Opornik nieliniowy z dwu-segmentową charakterystyką. Parametry, jak w diodzie; ponadto: Rf – szeregowo włączona rezystancja dla dodatniego kierunku przewodzenia, Rb – dla kierunku przeciwnego ($u < Vig$).
	DIODEN (Shockley) 	Vig [V] Rf [Ω] CLOSED Rb [Ω] Is [A] Vmax [V] NP	Opornik nieliniowy z liczbą segmentów NP+2 o charakterystyce: $i = Is * (\exp(u/Vig) - 1)$.
	DIODEN (point list) 	Rf [Ω] CLOSED Rb [Ω]	Opornik nieliniowy określony przez max. 23 punkty. Rf, Rb – szeregowo włączone rezystancje, jak w <i>two segments</i> ..

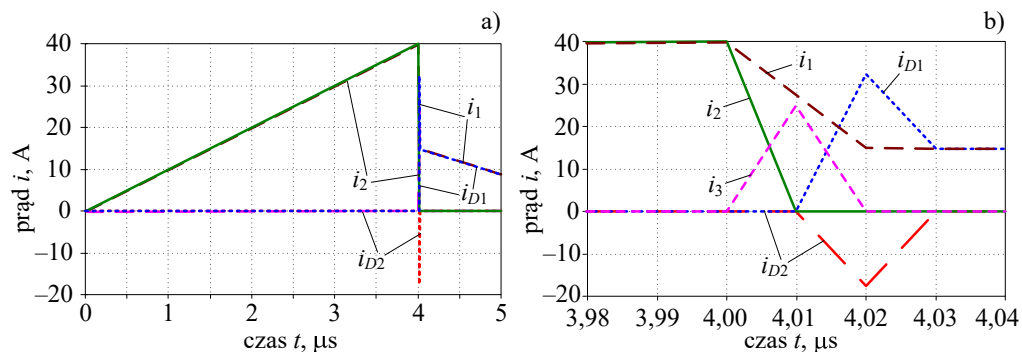


Rys. C.1. Schemat układu do opisu zmiennymi stanu

Rozpatrzmy sekwencję łączy w rozpatrywanej sieci z wyłączoną opcją *Gifu*. Przyjęto okres modelowania $T = 0,01 \mu\text{s}$. W fazie początkowej, sygnał $SIG = 1$ i sterowany łącznik jest zamknięty, co powoduje uziemienie węzła $N2$. Prądy i_1 oraz i_2 są niemal równe, gdyż równoległa rezystancja w gałęzi $N1-N2$ jest duża ($10 \text{ k}\Omega$), a prąd ładowania kondensatora w gałęzi $N7-N3$ jest niewielki (rys. C.3). W czasie $t = 4 \mu\text{s}$ następuje wyłączenie łącznika uziemiającego, co wywołuje sekwencję zdarzeń, które wymagają szczegółowej analizy.

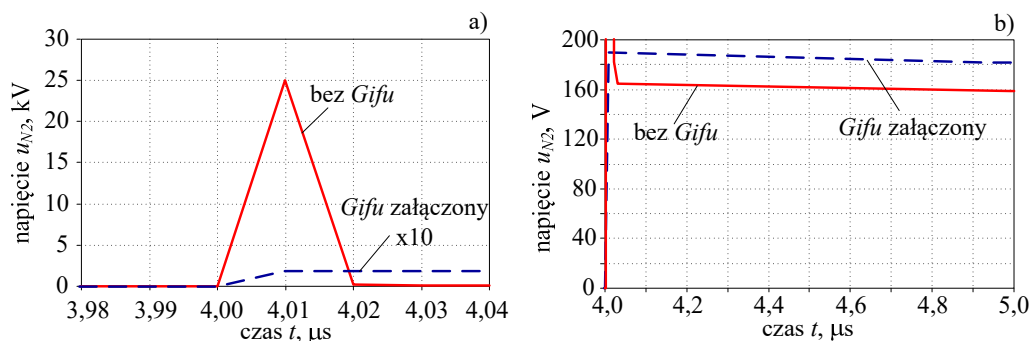


Rys. C.2. Okno dialogowe elementu SW_TACS (TYPE 13)



Rys. C.3. Przebiegi prądów w obwodzie bez mechanizmu *Gifu*; szczegóły komutacji (b)

Gwałtowna zmiana prądu i_1 powoduje duży skok napięcia w węźle $N2$ (rys. C.4), co wywołuje impuls prądowy w gałęzi $N7-N3$ (prąd i_3 na rys. C.3b) i następnie załączenie diody w gałęzi $N2-N3$ oraz odwrotne przewodzenie diody w gałęzi $N2-N4$. Szczegóły są pokazane na rys. C.3b. Po ustaniu gwałtownego zaburzenia, w węźle $N2$ ustala się lekka nadwyżka napięcia, co powoduje rozładowanie energii zgromadzonej w indukcyjności gałęzi $N1-N2$ i przepływ prądu w kierunku źródła o napięciu 150 V. W rezultacie, napięcie w węźle $N2$ stopniowo się zmniejsza (ciągła linia na rys. C.4b).



Rys. C.4. Napięcia powstające w węźle $N2$ po wyłączeniu tyrystora: przepięcia spowodowane zmianą prądu w indukcyjności (a); zanikanie napięcia (b)

Obserwowane w tym eksperymencie zjawiska przejściowe są charakterystyczne dla tego typu niekontrolowanych stanów dynamicznych:

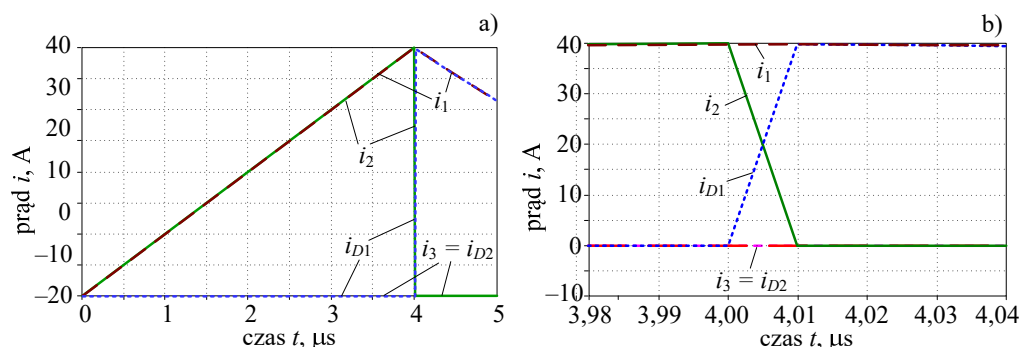
- duże impulsy przepięciowe;
- pojedyncze impulsy prądowe;
- wieloetapowy stan przejściowy;

- rezultat zakończenia stanu przejściowego jest często nieprzewidywalny.

Zauważmy, że obie diody połączone w węźle $N2$ konkurują w zakresie załączenia (przejście do stanu przewodzenia) w sprzyjającej po temu okoliczności. Kontrola tej ‘konkurencji’ jest właśnie podstawą działania *algorytmu Gifu*. Polega on na wykonaniu następującej procedury, która jest inicjowana przy zmianie położenia łącznika z deklaracją *Gifu* ($Gifu = 1$ w deklaracji na rys. C.2):

- wstrzymanie standardowej procedury rozwiązywania sieci w kolejnym kroku symulacji;
- wykonanie testowych obliczeń sieci z wymuszoną zmianą położenia kolejnych łączników połączonych w węźle z łącznikiem sterowanym z deklaracją *Gifu*, przy czym:
 - załączany jest element typu dioda lub tyrystor, jeśli przepływający prąd o kierunku zgodnym jest największy;
 - dioda z największym prądem wstecznym jest wyłączana.

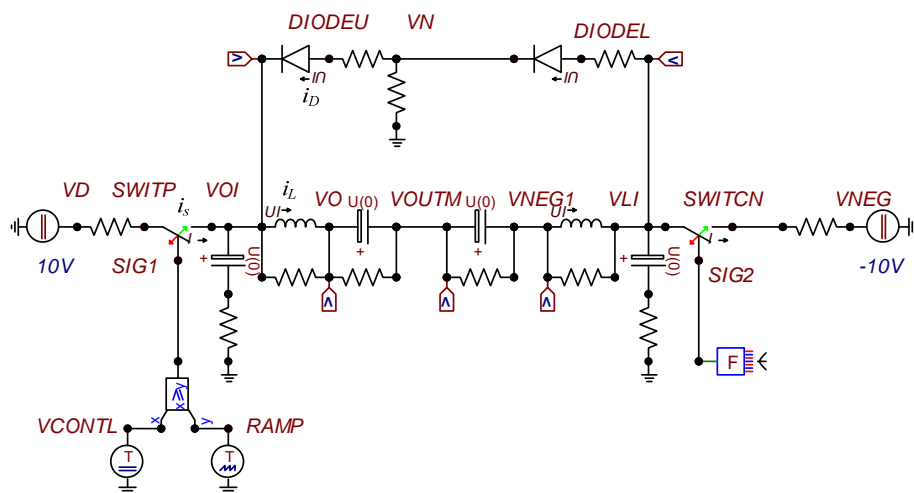
W celu sprawdzenia tej procedury, w rozpatrywanej sieci (rys. C.1) wprowadzamy deklarację $Gifu = 1$ w parametrach łącznika sterowanego z bloku *MODELS*. Uzyskane przebiegi prądów są pokazane na rys. C.5. Widać, że tym razem nowy stan łączników jest ustalany w jednym kroku symulacji. W sieci nie występują przebiegi (rys. C.4a) ani dodatkowe impulsy prądowe (rys. C.5b). Po zmianie sygnału sterującego *SIG* następuje ciągła zmiana prądu i_1 oraz napięcia w węźle $N2$ (rys. C.4b). Nieznacznie tylko zmienia się prąd i_3 , natomiast dioda $D2$ nie przechodzi w stan przewodzenia (w stanie przejściowym napięcie u_{N2} jest mniejsze od napięcia źródła z drugiej strony diody: $u_{N2} < 200$ V – rys. C.4b).



Rys. C.5. Przebiegi prądów w badanej sieci przy załączonym algorytmie *Gifu*: (a); szczegół (b)

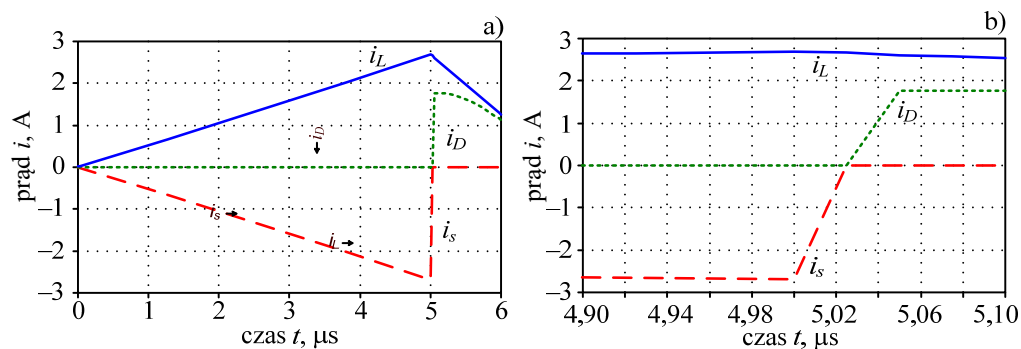
W programie ATP-EMTP łączniki mogą być także sterowane z bloku TACS. Przykład takiego rozwiązania jest podany na rys. C.6³. Oba łączniki są sterowane sygnałami z bloku TACS, przy czym, $SIG1 = SIG2$. Zbadajmy wpływ algorytmu *Gifu* inicjowanego w obu łącznikach, na przebieg procesu łączeniowego. Przyjmujemy krok symulacji $T = 2,5$ μs.

³ Przykład ten jest utworzony na bazie przykładu 5 z pliku *DCN17.dat* dostępnego w zbiorze *BENCHMARK* na dysku instalacyjnym programu ATP-EMTP.



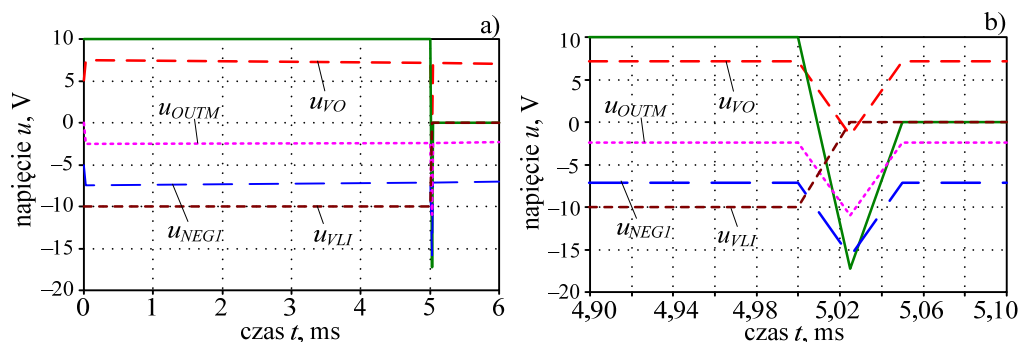
Rys. C.6. Model ATPDraw rozpatrywanej sieci

Najpierw zbadajmy przebieg procesu towarzyszącego wyłączeniu wyłączników w sytuacji odstawienia procedury *Gifu* ($Gifu = 0$ w parametrach obu wyłączników). Przebiegi prądu wyłącznika sterowanego sygnałem *SIG1*, prądu diody *DIODEU* oraz prądu płynącego przez indukcyjność w gałęzi *VOI* – *VO* są pokazane na rys. C.7.



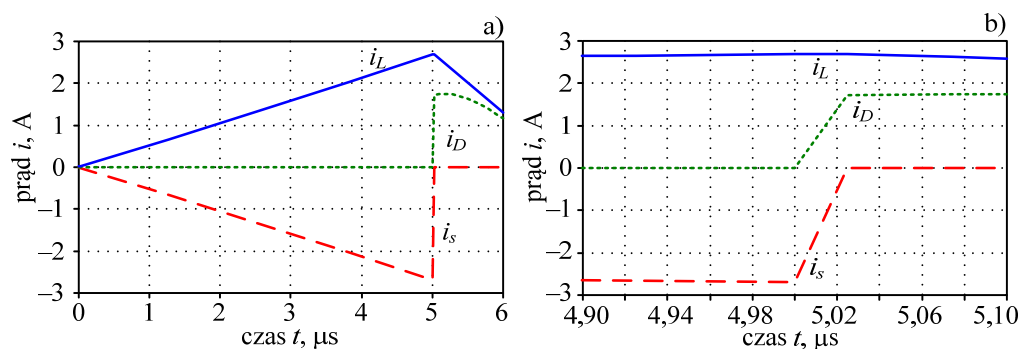
Rys. C.7. Przebiegi prądów w badanej sieci przy wyłączonym algorytmie *Gifu*

Widać, że proces przełączenia jest realizowany w dwóch krokach (rys. C.7b): najpierw wyłączany jest wyłącznik, a w następnym kroku zaczyna przewodzić dioda. Pomimo tego, prąd i_L zachowuje ciągłość, co jednak łączy się z wystąpieniem dużych skoków napięcia w poszczególnych węzłach (rys. C.8).

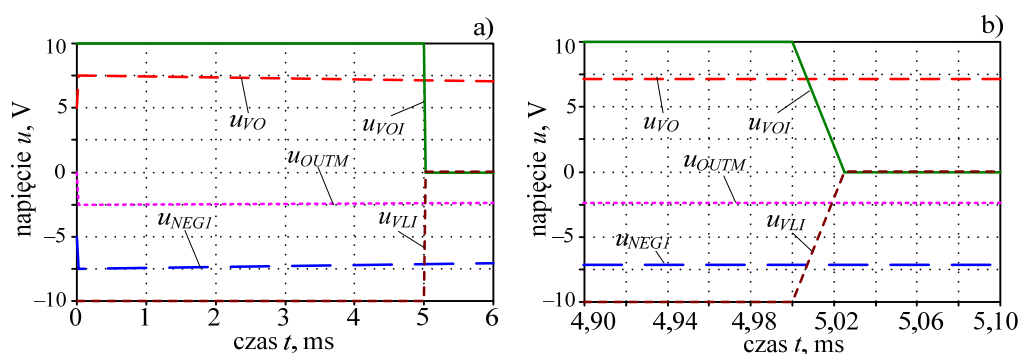


Rys. C.8. Przebiegi napięć w badanej sieci przy wyłączonym algorytmie *Gifu*

Przebiegi tych wielkości pod nadzorem algorytmu *Gifu* są pokazane na rysunkach C.9 oraz C.10. Widać, że w tym przypadku przełączenie zachodzi w jednym kroku, a otrzymane przebiegi prądów i napięć są regularne, bez niepożądanych zmian.



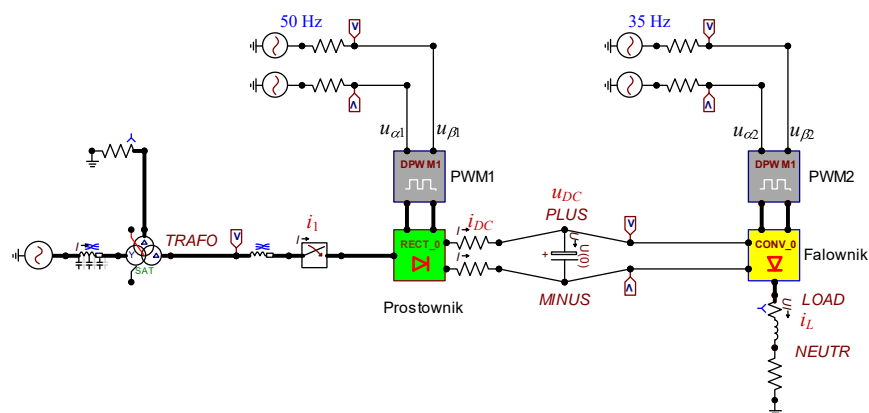
Rys. C.9. Przebiegi prądów w badanej sieci przy załączonym algorytmie *Gifu*



Rys. C.10. Przebiegi napięć w badanej sieci przy załączonym algorytmie *Gifu*

Algorytm *Gifu* można także stosować w odniesieniu do bardziej złożonych przypadków, gdy do węzła jest przyłączonych wiele łączników. Przykład modelu takiej sieci jest pokazany na rys. C.11, gdzie odbiornik jest zasilany z przekształtnika AC-AC typu *back-to-back* ze źródłem napięciowym []. Prostownik oraz falownik mają jednakowe schematy połączeń (rys. C.12). Są one sterowane za pośrednictwem układów modulacji szerokości impulsów: *PWM1* oraz *PWM2*. Modele tych układów są utworzone w blokach MODELS, a ich sterowanie odbywa się za pomocą wektorów przestrzennych napięcia, oznaczonych na rys. C.11 przez składowe $u_{\alpha 1}$, $u_{\beta 1}$ oraz $u_{\alpha 2}$, $u_{\beta 2}$, odpowiednio do wyzwalania łączników prostownika i falownika. Dla uproszczenia, przyjęto stałe częstotliwości sygnałów sterujących, generowane przez sinusoidalne źródła napięciowe: 50 Hz – dla prostownika oraz 35 Hz – dla falownika. Przyjęto krok symulacji $T = 5 \mu s$, natomiast sygnały PWM są impulsowane z częstotliwością 1200 Hz przy współczynniku modulacji amplitudy (współczynnik głębokości modulacji) $ma = 0,9$ [].

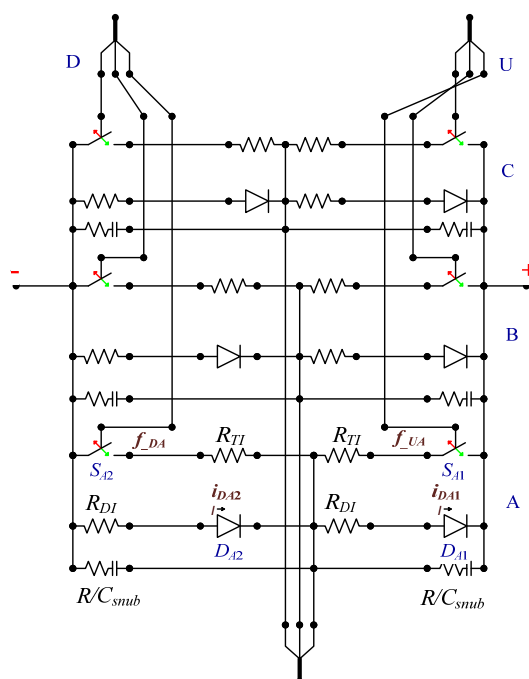
Pliki tworzące model ATPDraw są umieszczone w zbiorze *AC_AC_1.ZIP*. Jest to dosyć złożony układ i śledzenie jego szczegółów wymaga sporego doświadczenia zarówno w zakresie obsługi programu ATP-EMTP, jak również zasad konstrukcji przekształtników energoelektronicznych. Poniżej zajmujemy się jedynie omówieniem zastosowania algorytmu *Gifu* w celu uzyskania poprawnych warunków pracy zastosowanych modeli łączników elektronicznych.



Rys. C.11. Model ATPDraw sieci z prostownikiem i falownikiem

Na rys. C.12 jest pokazany szczegółowy opis elementów tworzących ramiona przekształtnika fazy A. Przyjęto następujące wartości ukazanych parametrów: $R_{TI} = R_{DI} = 0,001 \Omega$, $R_{snub} = 10 \Omega$, $C_{snub} = 4,7 \mu F$. Napięcie załączania diody w kierunku przewodzenia: $V_{IG} = 1 V$. Sterowanie jest inicjowane przez łączniki wyzwalane za pomocą impulsów PWM (mogą one odwzorowywać podstawowe łączniki energoelektroniczne, jak np. tranzystory IGBT). W oknie dialogowym modelu takiego łącznika

można ustawiać aktywność algorytmu *Gifu* za pomocą zmiennej *GIF*. Wszystkie zmienne odnoszące się do modelu przekształtnika są reprezentowane za pomocą parametrów *\$PARAMETER*, które można ustawiać w programie ATPDraw w oknie dialogowym: *ATP/Settings/Variables*.

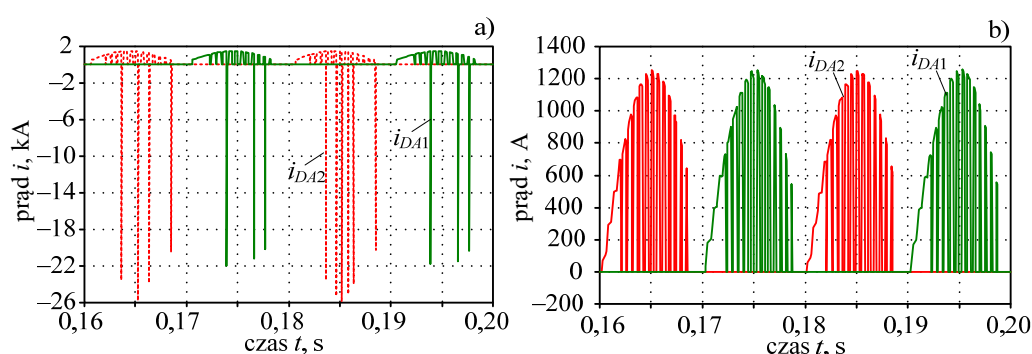


Rys. C.12. Model ATPDraw prostownika i falownika

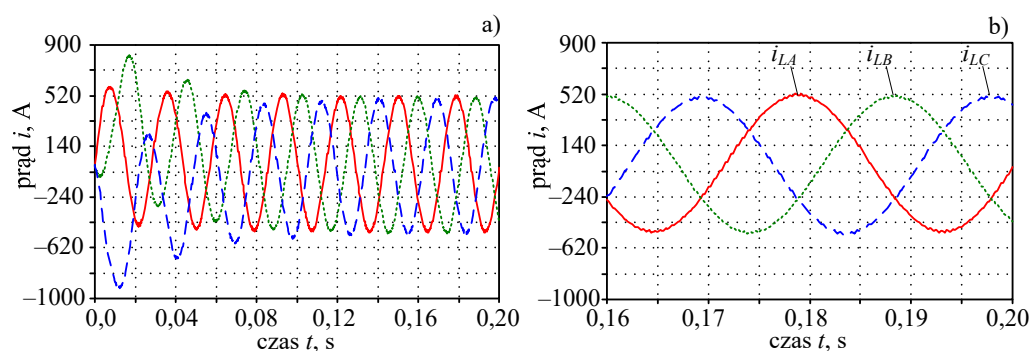
Efekt działania algorytmu *Gifu* prezentują kolejne rysunki. Na rys. C.13 są pokazane przebiegi prądów w diodach D_{A1} oraz D_{A2} prostownika przy wyłączonym i załączonym algorytmie *Gifu*. Widać, że przy braku kontroli załączania odpowiednich łączników (rys. C.13a), przebieg tych prądów jest bardzo chaotyczny, z występowaniem dużych impulsów o odwrotnym kierunku przewodzenia, co odbiega od rzeczywistych procesów. Przebiegi trójfazowego prądu obciążenia falownika są pokazane na rys. C.14. Początkowy stan przejściowy jest związany z przyjętymi zerowymi warunkami początkowymi. Można sprawdzić, że zachowana jest założona częstotliwość przebiegu 35 Hz.

Algorytm *Gifu* skutecznie usuwa dynamiczne nieprawidłowości w przebiegu gwałtownych zmian prądu, wywołanych przełączeniami w układach z łącznikami, które są reprezentowane w uproszczony sposób – bez odwzorowywania szybkich procesów, które zachodzą w rzeczywistych łącznikach. Jego idea polega na uaktywnieniu – spośród oczekujących na załączenie – tego łącznika (diody lub tyrystora), który w danym kroku symulacji spowoduje przepływ przez niego prądu o największej amplitudy.

tudzie. W tym samym kroku symulacji wyłączana jest także dioda, w której zostanie zidentyfikowany największy prąd o wstecznym kierunku. Wymaga to wykonania dodatkowych testowych kroków, które wydłużają czas obliczeń. Należy, więc maksymalnie redukować liczbę łączników, w których aktywowana jest ta procedura. W złożonych układach nie jest to proste zadanie, gdyż działanie procedury zależy od konfiguracji łączników i schematu badanej sieci. Na przykład, można sprawdzić, że w układzie z rys. C.11, poprawne działanie zostaje zachowane, gdy ograniczymy procedurę *Gifu* tylko do trzech łączników w górnych lub dolnych ramionach prostownika, co niemal czterokrotnie skraca czas symulacji.



Rys. C.13. Przebiegi prądów w diodach prostownika z wyłączonym (a) i załączonym (b) algorytmem *Gifu*



Rys. C.14. Przebiegi prądów w obciążeniu falownika przy załączonym algorytmie *Gifu*

Na bazie układu z rys. C.11 można budować złożone modele systemów z przekształtnikami *AC-AC*, które są, na przykład, stosowane w napędach z silnikami indukcyjnymi. W takim przypadku należy utworzyć model odpowiedniego układu sterującego, który będzie kontrolował sygnały na wejściu generatorów impulsów PWM.