

Artur Wodoląński

Ko sy mu la cja

Elastyczne projektowanie
i symulacja wielodomenowa



Wydawnictwo
Naukowe
Helion 

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz wydawca dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz wydawca nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Redaktor prowadzący: Małgorzata Kulik

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn

Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zaprucki

Grafika na okładce została wykorzystana za zgodą Shutterstock.com

Helion S.A.

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: helion@helion.pl

WWW: <https://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<https://helion.pl/user/opinie/kosymu>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

ISBN: 978-83-283-8719-5

Copyright © Helion S.A. 2022

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

SPIIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
1 KOSYMULACJA — WPROWADZENIE	7
1.1. Kosymulacja: podstawowe definicje i pojęcia	7
1.2. Kosymulacyjny „framework”: wymagania i struktura	15
1.3. Implementacja modelu FMU do kosymulacji	16
2 WZORCE KOMUNIKACYJNE I SPRZĘŻENIA UKŁADÓW W KOSYMULACJI	19
2.1. Silne i słabe (miękkie i twarde) metody sprzężenia w kosymulacji	19
2.2. Metody sprzężenia kosymulacji — wzorce komunikacyjne	24
2.3. Kosymulacja dyskretna, ciągła i hybrydowa	27
3 ZAGADNIENIA KOSYMULACJI W PRAKTYCZNEJ REALIZACJI	31
3.1. Metody integracji czasu	31
3.2. Stabilność kosymulacji	35
3.3. Redukcja rzędu modelu	36
4 OPROGRAMOWANIE STOSOWANE W KOSYMULACJI	39
4.1. Oprogramowanie wysoko- i niskokodowe	39
4.2. Assimulo	43
5 ZADANIA I PRZYKŁADOWE ROZWIĄZANIA	45
5.1. Odbijająca się piłeczka pingpongowa	46
5.2. Oscylator Van der Pola	48
5.3. Zadania do samodzielnego rozwiązania	49
5.4. Podpowiedzi do zadań	49
ZAKOŃCZENIE	51
LITERATURA	53
SKOROWIDZ	59

2

WZORCE KOMUNIKACYJNE I SPRZĘŻENIA UKŁADÓW W KOSYMUŁACJI

2.1. Silne i słabe (miękkie i twarde) metody sprzężenia w kosymulacji

Kosymulacja służy do opisanie symulacji, w której co najmniej dwie różne symulacje są ze sobą połączone. Sposoby sprzężenia dwóch różnych podsystemów (*coupling*) są obejmowane różnymi definicjami [16]. Kosymulacja może być rozumiana jako skrót od współdzielonej symulacji lub symulacji sprzężonej. Inne używane synonimy tego terminu to: sprzężony symulator, modularna integracja czasu, integracja w czasie rozproszonym, symulacja modułowa, sprzężenie modeli w opisie modelu behawioralnego, (multidyscyplinarna) symulacja oparta na współpracy, równoległość w całym systemie, równoległość w przestrzeni czy model hybrydowy [2, 17]. Definiując główną różnicę pomiędzy kosymulacją a sprzężeniem modeli, należy podkreślić znaczenie terminologii kosymulacji. Sprzężenie modeli odbywa się na znacznie głębszym poziomie, w którym model jest następnie symulowany w całości.

Przykładem łączenia (sprzęgania modeli) byłaby integracja ciągłego systemu czasu w dyskretny model oparty na zdarzeniach poprzez implementację formalizmu DEV i DESS [18] lub model wielodomenowy łączący agenta z dynamiką systemu. Jednakże kosymulacja występuje jako opis w modelu behawioralnym, a nie matematycznym, gdzie sprzężenie symulatora jest czasami używane równoważnie do kosymulacji [19]. Definicją kosymulacji można opisać sprzężenie (innymi słowy — dynamiczną wzajemną wymianę danych) kilku programów symulacyjnych, w tym ich numerycznych solverów, w celu symulacji całego systemu składającego się z kilka podsystemów. Jeśli jednak symulowane są dwa systemy przez ten sam symulator przy użyciu tylko różnych kroków czasowych, gdzie połączone symulacje systemów

wykorzystują różne skale czasowe, również to zjawisko jest definiowane pojęciem kosymulacji — jako połączenie dwóch symulacji [19, 20].

Kosymulacją jest również układ dwóch systemów w różnych symulatorach wykorzystujących różne solvery i indywidualne rozmiary kroków czasowych, w których stosowane są algorytmy i różne narzędzia symulacyjne [16]. Definicją kosymulacji można również nazwać połączenie dwóch lub więcej symulacji, które różnią się co najmniej jednym z poniższych aspektów: narzędziami do symulacji, solverem lub rozmiarem kroku czasowego w symulacji. Dwa systemy mogą być symulowane w dwóch różnych symulacjach używających różnych solverów i różnych rozmiarów kroków czasowych. Mogą mieć dwa różne narzędzia do kosymulacji, ale używać tego samego solvera i nawet tego samego rozmiaru kroku. Mogą mieć ten sam krok czasowy, ale różnić się solverem. Z kolei symulacje, które nie różnią się ani narzędziem, ani algorytmem solvera, ale tylko wielkością kroku, są zdefiniowane jako symulacje wieloparametrowe [18]. Kosymulacja może być również oparta na agentach z dynamiką systemu [21] w czasie rzeczywistym, która bazuje na symulacjach z komponentami fizycznymi, połączonymi symulacjami mikroskopowymi z mezoskopowymi lub analogowymi z cyfrowymi. Również symulacja hybrydowa może być stosowana do opisanego połączenia zdarzeń dyskretnych z ciągłym czasem.

W kosymulacji łączenie *coupling* — sprzężanie poszczególnych komponentów: podsystemów — odbywa się na dwa sposoby:

- Sprzężenia słabe (*weak-coupling*) — inaczej zwane jako: sprzężenia quasi-dynamiczne (luźne), sprzężenia typu „ping-pong” [19]. W sprzężeniach słabych poszczególne modele reprezentowane są przez dane podsystemy zawierające wewnętrzny integrator, który zapewnia wymianę informacji pomiędzy połączonymi modelami za pośrednictwem wejść/wyjść modelu, które są realizowane tylko w określonych punktach komunikacyjnych. Podejście to ma kilka zalet, m.in. umożliwia dostosowanie integratorów do modeli, umożliwia równoległe uruchamianie modeli, gdzie modele te mogą mieć różne skale czasowe wykorzystywane poprzez słabe sprzężenia lub poprzez wewnętrzny integrator. Do głównych wad tego podejścia należy sposób wymiany informacji, m.in. to, jak powinna przebiegać wymiana informacji, aby symulacja była stabilna. Warunkiem zaistnienia sprzężenia słabego dla dwóch przykładowych podsystemów opisanych równaniami (1) i (2):

$$\dot{y}_1 = f_1(y_1, y_2, t) \quad \dot{y}_1(t_0) = y_{1,0} \quad (1)$$

$$\dot{y}_2 = f_2(y_2, y_2, t) \quad \dot{y}_2(t_0) = y_{2,0} \quad (2)$$

jest intensywność, każdy uczestniczący podsystem zależy od wyników, zgodnie z warunkiem (3):

$$\left\| \frac{\partial f_1}{\partial y_2} \right\| \ll \left\| \frac{\partial f_1}{\partial y_1} \right\| \quad \text{i} \quad \left\| \frac{\partial f_2}{\partial y_1} \right\| \ll \left\| \frac{\partial f_2}{\partial y_2} \right\| \quad (3)$$

Integratory specyficzne dla domeny mogą mieć lepszą wydajność w porównaniu z integratorem ogólnego przeznaczenia [22, 23]. Solver używany w tym podejściu jest zwykle w nieznanym scenariuszu kosymulacji. Integrator zapewnia wykonanie globalnego kroku integracji (lub makrokroku), a następnie przeprowadza etap integracji lokalnej (mikrokroku). Globalnym krokiem integracyjnym jest przejście systemu modelu od Tn do $Tn+1$, podczas gdy lokalne etapy integracji (tn, m), to kroki podjęte przez wewnętrzny solver w każdym podsystemie. Sprzężenia słabe często wymagają małych kroków synchronizacji oraz są również bardziej podatne na akumulację błędów i problemy ze stabilnością niż silne metody sprzężenia, które z kolei zajmują więcej czasu obliczeniowego ze względu na częstszą wymianę danych i ciągłe iteracje. Kosymulacje ze sprzężeniami słabymi są szybsze, mniej kosztowne obliczeniowo w porównaniu do kosymulacji złożonych systemów ze sprzężeniem silnym.

- Sprzężenia silne (*strong-coupling*) — inaczej zwane jako: sprzężenia cebulowe, sprzężenia w pełni dynamiczne, klejone [24]. Silne sprzężenia są stosowane, gdy pożądane są wyniki o wysokiej dokładności. W każdym etapie czasowym symulatory wymieniają między sobą dane, dopóki nie zostaną spełnione kryteria zbieżności. Implementacja ta wymaga numerycznego rozwiązania nieliniowego układu równań, w którym kryteria określane są funkcją zmiennych stanu sprzężonych symulatorów.

W przypadku kosymulacji wiele podprogramów korzysta z rozwiązań niskiej precyzji. Może to spowodować znaczny szum numeryczny, który wywołuje problemy z konwergencją dla symulacji. Silne sprzężenia opisują sprzężenie dwóch lub więcej symulacji z iteracjami w każdym kroku czasowym, gdzie każdy podsystem wymaga spełnienia określonych błędów tolerancji. W tym przypadku podsystemy nie używają indywidualnych kroków czasowych między dwoma krokami makro.

Czas obliczania silnego sprzężenia w porównaniu z luźnym sprzężeniem został porównany przez M. Trčka [24] w symulatorze HVAC/R. Chociaż luźne sprzężenie wymagało krótszych czasów synchronizacji, czas pracy na jeden krok był mniejszy (ponieważ nie było potrzeby wykonywania iteracji) w porównaniu ze sprzężeniem silnym, co powodowało, że luźne sprzężenie działało szybciej niż mocne. Dodatkową zaletą luźnego sprzężenia jest to, że zmiennych stanu nie trzeba resetować do poprzednich wartości. W ten sposób luźne połączenie jest łatwiejsze do wdrożenia, bardziej niezawodne pod względem numerycznym, a eksperymenty przeprowadzane są szybciej [24]. W kosymulacji dane są wymieniane między różnymi podsystemami za pomocą ustalonego czasu synchronizacji. Biorąc pod uwagę, że model w kosymulacji udostępnia w jednym podsystemie dynamikę wewnętrzną, znaczy to, że możliwe jest bezpośrednio oszacowanie równań modelu, można łatwo zintegrować równania, które z kolei można rozwiązać przez standardową integrację czasową algorytmów. Podejście to jest powszechnie znane jako „silne sprzężenie”. Jednak jeśli model równania nie jest jawny, ale zamiast tego ukryty za interfejsem z jedynymi opcjami: ustawieniem wejść i pobrania wyjścia, generuje silne sprzężenia, które są wykonywane. W takich przypadkach używa się słabego sprzężenia, w którym znajdują się oddzielne modele, wewnętrzny integrator i przeprowadza się wymianę informacji między podłączonymi modelami za pośrednictwem wejścia i wyjścia, które są wykonywane tylko w określonych punktach komunikacyjnych podsystemów. Podejście to ma wiele zalet, ponieważ pozwala dostosować integratory do modeli komponentów. Dodatkowo pozwala na równoległe działanie modeli złożonych z komponentów. Co więcej, modele komponentów mogą mieć różne skale czasowe, które dzięki wykorzystaniu słabego sprzężenia mogą zostać wykorzystane przez wewnętrzny integrator. Jednak słabo powiązany system wprowadza również trudności, na przykład: jak należy przeprowadzić wymianę informacji w celu uzyskania stabilności całej symulacji [24].

W kosymulacji poszczególne korzyści związane ze wzrostem wydajności odbywają się za pośrednictwem korzystania z różnych skal czasowych w integratorze dla określonych komponentów oprogramowania. Obecnie w oprogramowaniu poczyniono ulepszenia do automatycznego wyboru rozmiaru kroku czasowego, omówiono metody wielokrokowe dla liniowych metod na poziomie wieloetapowym. Różnica między metodami o wielu etapach a metodami symulacji polega na tym, że w drugim przypadku równania nie są bezpośrednio ujawniane, a integrator odpowiedzialny za rozwiązywanie problemu jest ukryty i nieznan. W kosymulacji podsystemy są zasadniczo

określane jako czarne pudełka z wieloma wejściami i wyjściami. Kosymulacja może być prowadzona w sposób równoległy i działa na takiej zasadzie, aby umożliwić podsystemom symulowanie tego samego globalnego kroku czasowego, gdzie wszystkie podsystemy wymieniają między sobą informacje.

Korzystanie z tego podejścia odbywa się za pomocą wielordzeniowych procesorów, które można łatwo wykorzystać do poprawy wydajności całej symulacji. Dany podsystem jest rozwiązywany dla globalnego kroku czasowego, a po jego zakończeniu następny kolejny podsystem jest symulowany na tym samym globalnym kroku czasowym.

W kosymulacji omawianej z punktu widzenia reprezentacji bloku zbioru modeli każdy model określa dynamikę danego podsystemu, niedostępną na zewnątrz. Tutaj blok wchodzi w interakcje z innym blokiem poprzez jego wejścia i wyjścia, gdzie równania sprzężone są poza blokami. Bloki są reprezentowane w ogólnej przestrzeni stanów. Stanowi to podstawę definicji frameworku FMI do kosymulacji. Standard FMI spowodował ponowne zainteresowanie kosymulacją, szczególnie w przemyśle. Stanowi to potencjał łączenia najnowocześniejszych narzędzi modelowania z wykorzystaniem standaryzacji.

Przy rozpatrywaniu kosymulacji dwóch podsystemów rozpatrywane są trzy rodzaje zdarzeń wpływających na zachowanie modelu:

- Zdarzenia stanu — zależą od profili rozwiązania stanu i dlatego nie są znane a priori. Model zapewnia zestaw wskaźników zdarzeń, które integrator monitoruje podczas procesu integracji. Jeśli jeden ze wskaźników zdarzeń przełącza domenę, występuje zdarzenie stanu. Integrator jest odpowiedzialny za znalezienie czasu, w którym wydarzenie miało miejsce.
- Czas zdarzenia — są znane a priori, co oznacza, że dla każdego segmentu symulacja jest znana, gdy wystąpi dane zdarzenie w czasie. Czas symulacji działa tylko dla danego segmentu. Następne zdarzenie czasowe jest obliczane na podstawie wcześniejszego zdarzenia czasowego.
- Krok zdarzenia — zdarzenia typu „krok” to zdarzenia, które zazwyczaj nie mają wpływu na zachowanie modelu, a są wydarzeniami ułatwiającymi integrację numeryczną. Na przykład można z nich korzystać przy parametryzacji modelu.

PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —



1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA
Helion 

Dane są obecnie zbierane, przetwarzane i analizowane dosłownie na każdym kroku, a otrzymane wyniki i płynące z nich wnioski oddziałują na każdy aspekt naszego życia. Modelowanie i symulacja to nieodzowne etapy projektowania wszelkiego rodzaju produktów i urządzeń przemysłowych. Pojazdy, budynki, konsumencki sprzęt elektroniczny, lecz także instalacje technologiczne, konstrukcje inżynierskie i specjalistyczna aparatura – wszystko to jest opracowywane i ulepszane właśnie dzięki symulacjom, a prototypy nowych urządzeń powstają i są testowane znacznie szybciej przy użyciu narzędzi cyfrowych.

Kosymulacja to zaawansowana technologia umożliwiająca jednoczesną symulację wielu zjawisk w różnych podsystemach dzięki wykorzystaniu specjalistycznych pakietów oprogramowania. Znajduje zastosowanie w wielodzielinowych, wieloskalowych symulacjach, w których łączy się różnego rodzaju domeny (mechaniczną, hydrauliczną, termiczną i elektryczną). Z tego powodu kosymulacja jest szczególnie często używana w roli narzędzia w badaniach naukowych w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i medycznym, a więc w branżach o największym potencjale rozwoju.

Książka jest przeznaczona dla osób pragnących poznać podstawy kosymulacji i usystematyzować wiedzę w tym zakresie. Ze względu na interdyscyplinarność narzędzia adresatami publikacji są przede wszystkim pracownicy IT, pracownicy akademicki, studenci kierunków automatyka i robotyka czy informatyka. Skorzystają z niej również osoby pracujące w przemyśle, zajmujące się na co dzień projektowaniem, modelowaniem lub symulacją, a szczególnie projektanci-konstruktorzy wykonujący symulacje na poziomie całego systemu.

- Wprowadzenie do zagadnienia kosymulacji
- Wzorce komunikacyjne i sprzężenia układów
- Realizacja kosymulacji w praktyce
- Oprogramowanie stosowane w kosymulacji
- Praktyczne zadania wraz z rozwiązaniami

Stosuj kosymulację w praktyce

Dr inż. Artur Wodolazski

W 2012 roku ukończył informatykę przemysłową ze specjalnością inteligentne systemy przemysłowe na Politechnice Śląskiej. W latach 2013 – 2016 był doktorantem na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki rodzimej uczelni, na kierunku automatyka i robotyka (temat pracy doktorskiej: *Modele wieloskalowych procesów ciągłych dla kosymulacji w projektowaniu systemów sterowania*). Autor licznych artykułów w czasopiśmie naukowych na temat modelowania i symulacji, kosymulacji, uczenia maszynowego. Obecnie pracuje w Zakładzie Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza GIG Instytutu Badawczego. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół uczenia maszynowego, big data, modelowania procesów technologicznych, kosymulacji.

<https://orcid.org/0000-0003-4287-8279>

<https://www.researchgate.net/profile/Artur-Wodolazski>

Helion



helion.pl



HELION SA
ul. Kościuszki 1c
44-100 Gliwice
tel.: 32 230 98 63
helion@helion.pl

Sprawdź nasze szkolenia!



AKADEMIA IT & BUSINESS

HELIONSZKOLENIA.PL

KOD KORZYŚCI
Sięgnij po więcej! ▶



ISBN 978-83-283-8719-5



INFORMATYKA W NAJLEPSZYM WYDANIU

Cena: 39,00 zł