



УДК 004.942:62-83

**MODELING OF ENERGY CONVERTERS OF DIFFERENT PHYSICAL NATURE****МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ****Kurliak P. O. / Курляк П.О.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-8113-5211

*Ivano Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,**Ivano Frankivsk, Karpatska, 15, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,**Карпатська, 15, 76019***Kostyshyn V.S. / Костишин В.С.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-8606-3931

*Ivano Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,**Ivano Frankivsk, Karpatska, 15, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,**Карпатська, 15, 76019***Batsala Y.V. / Бацала Я.В.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-4964-407X

*Ivano Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,**Ivano Frankivsk, Karpatska, 15, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,**Карпатська, 15, 76019*

**Анотація.** В статті розглянуто методологію моделювання перетворювачів енергії та описано основні постулати методу Bond Graph. Здійснено порівняння двох різнопланових аналогій між фізичними змінними систем різної фізичної природи та обґрунтовано доцільність застосування енергетичного підходу для комплексного моделювання складних технічних об'єктів з метою оперативного розрахунку та оптимізації режимів їх роботи.

**Ключові слова:** перетворювач енергії, моделювання, енергетичний підхід, Bond Graph.

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку наукового прогресу, вирішення задачі оперативного розрахунку та оптимізації режимів роботи будь-яких технічних об'єктів належить комп'ютерному моделюванню, оскільки з розвитком та вдосконаленням обчислювальної техніки стає можливою реалізація основної ідеї фізичного моделювання системи – багаторазового повторення варіантів будь-якого режиму роботи з метою дослідження її параметрів або вибору оптимального керування.

Існує багато традиційних методів математичного моделювання динамічних систем, які є адаптованими тільки для системи однієї фізичної області. Однак не в достатній мірі для моделювання таких систем розроблені інструменти автоматизованого проектування. Більшість алгоритмів і комп'ютерних програм застосовують для числового вирішення рівнянь системи. Крім того, спеціалізовані методи моделювання не дають задовільних результатів для інших фізичних підсистем та не дають змоги проводити повне комплексне дослідження системи.



Отже, для ефективного проектування сучасних складних технічних систем, аналізу їх динамічних режимів роботи та оптимального синтезу рівнянь стану системи необхідна могутня міждисциплінарна методологія моделювання та інструменти програмного забезпечення, які охоплюють всі складні енергетичні області і математичні моделі всіх фізичних підсистем [1].

**Основний текст.** Аналіз літературних джерел показав, що моделювання перетворювачів енергії різної фізичної природи зазвичай здійснюється на основі двох різнопланових концептуальних підходів, а саме використання багатопортового підходу та узагальненої теорії кіл Кірхгофа [2, 3]. Багатопортовий підхід передбачає розкладання складної системи на підсистеми – так звані „багатопортові елементи”, взаємозв’язок між якими здійснюється за допомогою сигналів. Термін „сигнал” використовується для відображення взаємодій, які забезпечують обмін інформацією між великими вузлами (портами) системи.

Із багатопортовим підходом у моделюванні тісно пов’язане об’єктно-орієнтоване моделювання. До сьогоднішнього дня немає загальноприйнятого розуміння концепції об’єктно-орієнтованого моделювання. Так в роботі [4] об’єктно-орієнтоване моделювання розглядають як конструкцію строго ієрархічних, модульних моделей. В роботах [2, 5], застосовуючи об’єктно-орієнтоване моделювання, розглядають кожну підсистему як предмет, що має свій власний алгоритм (метод) моделювання. Всі предмети зв’язуються через передачу повідомлень, координують свою поведінку, і, таким чином, виконується моделювання повної системи.

Узагальнена теорія кіл Кірхгофа базується на енергетичних підходах та принципах, які зазвичай використовують в теорії електричних мереж. Та при застосуванні їх для аналізу підсистем іншої фізичної природи необхідно ввести певні зміни в основні поняття. Формулювання основних законів механіки узагальнене згідно з законами Ньютона та представлено у формі законів Кірхгофа, а саме: повна сума переміщень по замкнутому контурі та алгебраїчна сума всіх сил, що діють на тіло рівні нулю [6].

Погляди, щодо енергетичних підходів при аналізі перетворювачів енергії різної фізичної природи відображаються в роботах Лейбніца, Лагранжа, Ейлера. Застосування енергетичних методів базується на теоремі Телледжена, яка спочатку була сформульована для електричних мереж, а пізніше узагальнена для всіх мереж і структур іншої фізичної природи [7]. Теорему Телледжена, яка виражає закон збереження енергії в просторі, можна використовувати як основу для виведення великої кількості властивостей та визначення природного розвитку станів мереж.

Термін "мережа" використовується для опису моделей матеріальних систем в різних фізичних областях. Саме така форма опису носить назву узагальненої теорії кіл Кірхгофа [3]. Прикладами мереж є: електричні мережі, електронні системи, механічні та гідравлічні структури. Мережі складаються з активних і пасивних елементів. Взаємодія між вузлами мережі і навколишнім середовищем характеризується двома видами попарно-спряжених змінних. Для електричних мереж розглядаються пари змінних струму  $i$  та напруги  $u$ . Для



механічних структур можуть розглядатися пари – сила  $F$  і швидкість  $V$ , обертовий момент  $T$  і кутова швидкість  $\omega$ . У гідравлічній аналогії такими змінними є відповідно тиск  $p$  і об'ємна чи масова витрата рідини  $Q$  (кількість за одиницю часу). Добуток цих змінних визначає потужність (або роботу).

Вище зазначені два типи спряжених змінних в різних літературних джерелах отримали різні назви: наскрізні (*through*)- і поперечні (*over*)- змінні, транс (*trans*)- і інтер(*inter*)- змінні, або змінні зусилля (*efforts*) та потоку (*flows*). Чітке обґрунтування походження даних змінних вперше запропонував Файерстоун [8]. Він назвав ці змінні *across* і *through* (паралельна і послідовна) в залежності від способу їх вимірювання. В табл. 1 наведені відповідні пари змінних для різних фізичних областей.

Таблиця 1

**Типи енергетичних змінних для систем різної фізичної природи згідно теорії Файерстоуна**

Системи різної фізичної природи	Типи енергетичних змінних	
	послідовна ( <i>through</i> )	паралельна ( <i>across</i> )
Електрична	Струм, $i$	Напруга, $u$
Магнітна	Магнітний потік, $\Phi$	Магнітна напруга, $U_m$
Механічна поступового руху	Сила, $F$	Швидкість, $V$
Механічна обертового руху	Обертовий момент, $T$	Кутова швидкість, $\omega$
Термічна	Потік ентропії, $\xi$	Температура, $\theta$
Гідравлічна чи акустична	Об'ємна витрата, $Q$	Тиск, $p$

Така класифікація зображає силу, як таку що є аналогом струму і об'ємної витрати, а швидкість – аналог напруги і тиску. Згідно із цією аналогією тиск рідини не є аналогом сили не дивлячись на той факт, що він фізично визначається як сила, що діє на одиницю площі. Дану відповідність змінних можна фізично обґрунтувати застосовуючи методику вимірювання. Швидкість і напруга класифіковані як 'across' змінні, оскільки вони можуть бути виміряні як різниця між значеннями в двох точках (тобто, впоперек двох точок); сила і потік класифіковані як 'through' змінні, тому що можуть бути виміряні давачем в одній точці на шляху передачі енергії. Хоча така аналогія „сила подібна струму” знайшла широке застосування, очевидно, що така класифікація залишається важкою для розуміння.

Існує інша аналогія між парами змінних в різних фізичних областях, яка визначається так званою „фізичною інтуїцією” [3], що базується на корпускулярній моделі фізичного світу. Вважається, що передача енергії відбувається шляхом переміщення у просторі частинок – корпускул, які мають властивості маси, електричного чи магнітного заряду тощо. Отже механічна швидкість, електричний струм і об'ємна швидкість гідравлічного потоку є аналогічними поняттями. Така модель 'системи-частинок', веде до інтуїтивної аналогії „швидкість подібна струму”.



Інтуїтивну класифікацію наведених вище обох типів змінних можна краще обґрунтувати з використанням термодинамічного підходу [9]. Відповідно до нього внутрішня енергія елементів в різних фізичних областях може бути виражена як однорідна функція, властивості якої можуть використовуватися для визначення пари спряжених змінних системи. У термодинамічному підході застосоване однорідне рівняння просторових змінних. Приклади просторових змінних – маса і інерція механічної системи, які пропорційні кінетичній енергії системи. Часткові похідні внутрішньої енергії відносно просторових змінних називають інтенсивними змінними або 'зусиллями' (*efforts*). А похідні по часу змінних стану називаються 'потокami' (*flows*). В теоремі Телледжена [7] доведено, що потужність (кількість енергії, яка надходить до елемента за одиницю часу), рівна скалярному добутку векторів зусилля і потоку.

В табл. 2 дається огляд спряжених змінних зусиль і потоків та демонструється аналогія між різними фізичними областями згідно термодинамічного підходу [9]. Можна також розрізнити два види відносин взаємозв'язку, які відповідають наведеним нижче парам змінних. Для електричних мереж застосовуються закони балансу струмів і напруг Кірхгофа. У механічних структурах – рівноваги сил в опорах. Дані відносини взаємозв'язку описують неперервність змінних в просторі. Крім того, важливо відмітити, що відносини взаємозв'язку лінійні або можуть бути легко виражені в лінійній диференціальній формі.

Таблиця 2

**Типи енергетичних змінних для систем різної фізичної природи згідно теорії термодинамічного підходу**

Системи різної фізичної природи	Змінна стану	Типи енергетичних змінних	
		потік ( <i>flow</i> )	зусилля ( <i>effort</i> )
Електрична	заряд	Струм, $i$	Напруга, $u$
Магнітна	потік	Магнітний потік, $\Phi$	Магнітна напруга, $U_m$
Механічна поступового руху	переміщення	Швидкість, $V$	Сила, $F$
Механічна обертового руху	кутове переміщення	Кутова швидкість, $\omega$	Обертовий момент, $T$
Термічна	ентропія	Температура, $\theta$	Потік ентропії, $\xi$
Гідравлічна та пневматична	об'єм	Об'ємна витрата, $Q$	Тиск, $p$

Саме така аналогія, на основі термодинамічного підходу (табл. 2) покладена в основу методу *Bond Graph*, який започаткований професором Пейнтером [10] на початку шістдесятих років ХХ століття та розроблений його учнями Кернопом і Розенбергом [11]. У процесі моделювання методом *Bond Graph* в перетворювачах енергії різної фізичної природи відображається глобальна енергетична поведінка, яку можна представити комбінацією



чотирьох функцій: генерування, збереження, дисипації і перетворення.

Функція генерування представляється у вигляді джерел потоку -  $S_f$  та зусилля  $S_e$ , які відображають явно граничні умови системи і відповідають за обмін енергією з навколишнім середовищем. Вони виробляють або поглинають енергію в системі.

Функція збереження чинить опір зміні стану системи і включає в себе властивості затримування, запам'ятовування та зберігання. Тобто забезпечує те, що елементи мережі поведуться як акумулятори, які спочатку поглинають, а згодом віддають енергію. Ідеальні елементи зберігання називають енергетичними елементами  $C$ - та  $I$ -типу, які резервують всі види вільної енергії

Третя функція дисипації представляє розсіюючий ефект в результаті фізичних явищ, які можуть бути пов'язані зі зміною температури і тепловими втратами. Вони проявляються у разі витоку енергії внаслідок тертя, виділення тепла, тобто незворотній процес перетворення енергії. Розсіюючі елементи ідеальні резистори  $R$ -типу, називають ентропійними елементами.

Остання функція перетворення відповідає за трансформацію змінних без будь-якої втрати і зберігання енергії. Такий ідеальний ефект відбувається, наприклад, в механічних важелях, електричних трансформаторах та ідеальних перетворювачах енергії. В методі *Bond Graph* така властивість відображається елементами  $TF$  - трансформатора та  $GY$  - гіратора. Дані елементи служать для відображення зв'язку між підсистемами однієї або різної фізичної природи.

Для відображення взаємозв'язків між вищезазначеними елементами в межах однієї підсистеми існують два види з'єднань, а саме 0 і 1-сполучення. Елемент 0-сполучення описує перший закон Кірхгофа і представляє вузол, в якому всі зусилля сполучених елементів є рівними між собою. Прикладом такого з'єднання є паралельний зв'язок в електричному колі. За законом збереження енергії алгебраїчна сума потоків сполучених елементів рівна нулю. Елемент 1-сполучення описує другий закон Кірхгофа і володіє властивостями послідовного сполучення в електричному колі, в якому всі потоки сполучених елементів є рівні.

За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків метод *Bond Graph* забезпечує можливість комп'ютерного формування системних рівнянь, їх розв'язок, перевірку правильності синтезу моделей та у графічній формі подає наглядний опис складних систем різної фізичної природи.

**Висновки.** На сьогоднішній день у світовій практиці досить рідко застосовують системний підхід для дослідження та моделювання складних технічних об'єктів різної фізичної природи. Традиційно складові пристрої моделюють окремо різними методами, тому процес дослідження динамічних режимів роботи всього об'єкту стає надто трудомістким. Тому в даній роботі представлено міждисциплінарну методологію моделювання перетворювачів енергії різної фізичної природи та описано основні постулати методу *Bond Graph*.

**Література:**

1. Mann H. Modeling and Simulation [Text] / Herman Mann. – Computing and Information Centre of the Czech Technical University, 2005. – 149 p.
2. Schwarz P. Physically oriented modeling of heterogeneous systems [Text] / Peter Schwarz // Journal of Mathematics and Computers in Simulation – Special issue on 3rd IMACS Symposium on Mathematical Modelling — 3rd MATHMOD Vienna. – 2000. – Vol. 53. – P. 333–344. – ISSN 0378–4754.
3. Belle H. The structure of reality: A modern technical-scientific vision [Electronic resource] / Hubert Van Belle. – On-line: [http://www.vub.ac.be/CLEA/dissemination/groups-archive/vzw\\_worldviews/publications/vanbelle-real.html](http://www.vub.ac.be/CLEA/dissemination/groups-archive/vzw_worldviews/publications/vanbelle-real.html)
4. Cellier F. Continuous System Modeling [Text] / Francois Cellier; The University of Arizona. – New York: Springer–Verlag, 1991. – 712 p. – ISBN 0–387–97502–0.
5. Otter O. Energy flows modeling of mechatronic systems via object diagrams [Text] / O. Otter, H. Elmqvist // In 2<sup>nd</sup> International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD), Vienna, Austria. – 1997. – P. 705–710.
6. Sinha R. Modeling and Simulation Methods for Design of Engineering Systems [Text] / R. Sinha, V.C. Liang, C.J.J. Paredis, and P.K. Khosla // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2001. – Vol. 1. – P. 84–91.
7. Tellegen B. A general network theorem, with applications [Text] / B. D. H. Tellegen // Philips Research Reports, Vol. 7. – 1952. – P. 259–269.
8. Firestone F.A. The Mobility Method of Computing the Vibrations of Linear Mechanical and Accoustical Sysyem [Text] / F.A. Firestone // Mechanical–Electrical Analogies, J. Appl. Physics/ – 1938. – Vol.9. – P.373–378.
9. Hogan N. The Physical Basis of Analogies in Physical System Models [Text] / Neville Hogan, Peter C. Breedveld // Mechatronics an Introduction [Edited by Robert H. Bishop]; University of Texas at Austin. – New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – P. 111–121. – ISBN 978–0–8493–6358–0.
10. Paynter H. M. Analysis and Design of Engineering Systems [Text] / H. M. Paynter. – Cambridge: M.I.T. Press, 1961.– 268p.
11. Karnopp D. C. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems [Text] / Dean Karnopp, Donald Margolis, Ronald Rosenberg. – 3<sup>rd</sup> ed. – New York, NY [u.a.]:Wiley, 2000. – 507c. – ISBN 978–04713–3301–2.

**References:**

1. Mann H. Modeling and Simulation [Text] / Herman Mann. – Computing and Information Centre of the Czech Technical University, 2005. – 149 p.
2. Schwarz P. Physically oriented modeling of heterogeneous systems [Text] / Peter Schwarz // Journal of Mathematics and Computers in Simulation – Special issue on 3rd IMACS Symposium on Mathematical Modelling — 3rd MATHMOD Vienna. – 2000. – Vol. 53. – P. 333–344. – ISSN 0378–4754.
3. Belle H. The structure of reality: A modern technical-scientific vision [Electronic resource] / Hubert Van Belle. – On-line: [http://www.vub.ac.be/CLEA/dissemination/groups-archive/vzw\\_worldviews/publications/vanbelle-real.html](http://www.vub.ac.be/CLEA/dissemination/groups-archive/vzw_worldviews/publications/vanbelle-real.html)
4. Cellier F. Continuous System Modeling [Text] / Francois Cellier; The University of Arizona. – New York: Springer–Verlag, 1991. – 712 p. – ISBN 0–387–97502–0.
5. Otter O. Energy flows modeling of mechatronic systems via object diagrams [Text] / O.



Otter, H. Elmqvist // In 2<sup>nd</sup> International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD), Vienna, Austria. – 1997. – P. 705–710.

6. Sinha R. Modeling and Simulation Methods for Design of Engineering Systems [Text] / R. Sinha, V.C. Liang, C.J.J. Paredis, and P.K. Khosla // Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2001. – Vol. 1. – P. 84–91.

7. Tellegen B. A general network theorem, with applications [Text] / B. D. H. Tellegen // Philips Research Reports, Vol. 7. – 1952. – P. 259–269.

8. Firestone F.A. The Mobility Method of Computing the Vibrations of Linear Mechanical and Acoustical System [Text] / F.A. Firestone // Mechanical–Electrical Analogies, J. Appl. Physics/ – 1938. – Vol.9. – P.373–378.

9. Hogan N. The Physical Basis of Analogies in Physical System Models [Text] / Neville Hogan, Peter C. Breedveld // Mechatronics an Introduction [Edited by Robert H. Bishop]; University of Texas at Austin. – New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – P. 111–121. – ISBN 978–0–8493–6358–0.

10. Paynter H. M. Analysis and Design of Engineering Systems [Text] / H. M. Paynter. – Cambridge: M.I.T. Press, 1961.– 268p.

11. Karnopp D. C. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems [Text] / Dean Karnopp, Donald Margolis, Ronald Rosenberg. – 3<sup>rd</sup> ed. – New York, NY [u.a.]:Wiley, 2000. – 507с. – ISBN 978–04713–3301–2.

**Abstract.** *This article discusses the methodology of modeling energy converters and describes the basic tenets of the Bond Graph method. The comparison of two different analogies between physical variables of systems of different physical nature is made, and the expediency of applying the energy approach for complex modeling of complex technical objects in order to calculate and optimize their modes of operation is substantiated.*

**Key words:** *energy converter, modeling, energy approach, Bond Graph.*

Стаття відправлена: 10.10.2019 г.

© Курляк П.О.