

Всесоюзного симпозиума по вычислительной томографии. К., 1987. 4. Торгашев В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. М., 1973. 5. Аршинов М.Н. Коды математика. М., 1983. 6. Блейхут Г. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М., 1989.

УДК 681.3

Ю.В.Яцишин, Н.Б.Шаховська

НУ "Львівська політехніка", кафедра інформаційних систем та мереж

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ МІСТОМ НА ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЗАКОНІВ

© Ю.В.Яцишин, Н.Б.Шаховська, 2000

Authors of given article offer to represent a macroeconomic town model in appearance of thermodynamic system. A Basic idea is in use of thermodynamics laws for modeling of economic processes. For her realization was seen out comparative description of basic parameters of economic and thermodynamic systems and defined the joint lines in their conduct. A Program, which can be created on use base of thermodynamic laws, will allow to model a town economy state in dependence on given alternatives and development ideas. In given article counted the basic demands to such model and use variants of results found by it.

Управління — одна з найважливіших функцій держави. Управління економічною системою — невід’ємна частина процесу управління загалом. Економіка — відносини людей у процесі досягнення цілей при обмежених можливостях. Оскільки людей і цілей багато, а обмеження, які виникають, дуже різноманітні за якістю, то економіку можна вважати дуже складною системою, яку важко прогнозувати та моделювати.

Поняття економічної цілі часто буває дуже розмитим. Люди хочуть одного, а одержують інше, видозмінюють свої цілі, а іноді відмовляються від них, звертаючись до інших. Більше того, якщо навіть у поведінці учасника економічних відносин виявляється домінанта цілей, то цілком можливо, що вона міститиме іншу, приховану і навіть неусвідомлену ціль.

Класифікація цілей дуже важлива для адекватного опису моделі управління та економіки зокрема, і не настільки важливо те, щоб кожна ціль розумілася правильно, як те, щоб сукупність усіх цілей являла собою збалансовану систему людських інтересів. Тоді ми одержимо деяку модель економіки, у якій невеличка кількість показників економічної діяльності зрозумілим чином пов’язане з інтересами людей. Таку модель називають макроекономічною, і вона буде являти собою лінійний простір всіх економічних ідей.

Оскільки місто є частиною держави, то при управлінні ним використовуються ті самі закони, що і при управлінні державою.

Існує багато моделей управління. Поширення набули такі моделі: ієрархічні [2], моделі неокласичної теорії споживання і виробництва, загальної економічної рівноваги, економії росту і благополуччя, моделі економіки при недосконалій конкуренції і економетрика [6]. У [5] розглянуті макроекономічні моделі, які використовуються деякими розвинутими країнами та країнами з перехідною економікою (RMSM, EEM, Input-output model, SAM). Проте, як зазначають автори згаданих праць, у таких системах слабо реалізовані монетарний сектор економіки, блок платіжного балансу, прогнози показників державного боргу, взаємозв'язку системи національних рахунків. Але основною вадою таких моделей є їх залежність від часу: через певний період такі системи стають неадекватними і не відповідають існуючим умовам.

Моделі, побудовані на основі законів інших систем, певною мірою зменшують залежність від часу, тому що подають закони управління через закони функціонування фізичних систем.

У цій статті пропонується подати модель управління містом як термодинамічну систему.

Розглянемо основні характеристики економічної та термодинамічної систем. Як вже зазначалось, макроекономічна модель являє собою лінійний простір ідей (проектів), що пропонують варіанти подальшого розвитку міста. Це є відкрита система, яка взаємодіє з зовнішніми системами через грошові та ресурсні потоки. Будь-який проект характеризується двома величинами: затратами та очікуваним прибутком від його реалізації. Величина вкладених коштів у множину проектів обмежується міським бюджетом. На розвиток ідеї впливають економічні, політичні та соціальні фактори. Вони є тісно пов'язані між собою. Кожна епоха виділяє один з них як найголовніший для розвитку суспільства. Сьогодні на перше місце ставлять економіку, тобто матеріальне благо населення міста (чи області).

Кожна ідея має ступінь ефективності, тобто відношення між очікуваним прибутком та величиною затрат. Цей параметр визначає, у скільки разів підвищився рівень прибутку у кожній сфері діяльності людини (промисловість, сільське господарство, транспорт, сфера обслуговування тощо) після запровадження тієї чи іншої ідеї і чи це є вигідним для міста.

Також кожна ідея несе у собі частку невизначеності — ентропії, оскільки результати її реалізації залежать від подій, які відбуваються всередині міста, держави та на міжнародній арені (страйки, вибори, міжнародне становище, курси валют, стан економіки у інших сферах життя тощо).

Завдання експерта з управління полягає у тому, щоб, порівнюючи показники економічного росту при реалізації ідей у різних сферах життя, вибрати найкращу ідею (чи їх множину), із запровадженням яких місто отримає максимальний прибуток. Фактично ставиться задача розподілу ресурсів (бюджетних коштів, трудових та матеріальних

ресурсів, приватних і закордонних інвестицій) між різними сферами господарської діяльності (бо ідеї стосуються переважно визначених галузей). Крім того, потрібно вибрати такий стан суспільства, що досягається при запровадженні певної ідеї, в якому ентропія системи є найменшою.

З математичного погляду ми отримали динамічну багатокритеріальну задачу (критерії: максимізація прибутку, зменшення витрат на фінансування проекту, зменшення часу реалізації проекту тощо), в якій потрібно погоджувати інтереси сторін, проводити розподіл ресурсів, забезпечити неманіпульованість повідомлення оцінок отриманих прибутків від реалізації ідей, застосовувати різні механізми оцінювання і оперативного управління ризиком тощо (розглянуті у [2, 3]). Як бачимо, при такому формулюванні ми отримали складну задачу, яка навряд чи має ефективні алгоритми розв'язування.

Спростивши задачу, ми тим самим втратимо деяку частину важливої інформації, що призведе до погіршення якостей моделі. Отже, ми повинні шукати способи її “перевтілення” — зв'язку з іншими відомими системами.

Перейдемо до розгляду термодинамічної системи.

Термодинамічна система [4] — це сукупність макроскопічних тіл, які взаємодіють та обмінюються енергією як між собою, так і з іншими тілами (зовнішнім середовищем). Її можна представити як суміш газів. Основа термодинамічного методу — визначення стану термодинамічної системи. Стан системи задається термодинамічними параметрами, до яких належать температура (T), тиск (p) та питомий об'єм (V). Відоме співвідношення між даними величинами (дещо змінений закон Клапейрона-Менделєєва):

$$p = k \frac{T}{V}, \quad (1)$$

де k — деякий коефіцієнт пропорційності (необов'язково універсальна газова стала).

Перерахуємо інші важливі термодинамічні закони.

Закон Дальтона: тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, що входять у неї, тобто

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n, \quad (2)$$

де p_1, p_2, \dots, p_n — парціальні тиски.

Основними законами, які описують поведінку ідеальних газів, є закони Шарля, Бойля-Маріотта, Гей-Люссака.

Наведемо ще одну формулу, що визначає тиск газу:

$$p = nkT, \quad (3)$$

де n — концентрація молекул (кількість молекул в одиниці об'єму), k — коефіцієнт пропорційності (стала Больцмана).

Щоб виразити енергію E числом, необхідно ввести якусь одиницю Θ її виміру так, що ймовірність p фізично ймовірного стану буде функцією двох величин:

$$p = f\left(\frac{E}{\Theta}\right) \leq 1.$$

Тоді ентропією буде називатися величина:

$$S = -\sum p \ln p, \quad (4)$$

де підсумовування проводиться по всіх ймовірних станах системи. Тепер опишемо властивості ентропії, що нам будуть потрібні для побудови економічної аналогії.

1. Ентропія є опуклою функцією енергії.

Якщо $E = 0$, то ймовірність стану, в якому всі молекули нерухомі, дорівнює 1, а ймовірності інших станів — нулеві. Ентропія дорівнюватиме максимальному значенню.

Якщо $E = \Gamma$, то ймовірність станів, в яких молекули мають безкінечну швидкість, дорівнює одиниці, а всі інші стани мають ймовірність 0. Ентропія також буде дорівнювати нулеві.

2. Ентропія зменшується зі збільшенням кількості вільної енергії в системі:

$$S = \frac{Q_0 - Q_f}{T}, \quad (5)$$

де Q_0 і Q_f — повна і вільна енергії відповідно.

3. Якщо привести в зіткнення дві системи, то енергетична рівновага між ними можлива тільки в тому випадку, якщо параметр Q в обох систем однаковий. На цій підставі Q ототожнюється з температурою: $Q \in T$.

Наведені закони вже давно відомі і підтверджені експериментально.

Ідея описати економічну систему за допомогою термодинамічних законів є вже давно розвиненою. Найбільшого розвитку вона досягла завдяки праці І. Пригожина та І. Стенгерс ([7]). Зокрема, вони наголошували, що іатерії притаманна спонтанна активність, яка викликана нестійкістю нерівноважних станів, у які перейде система внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем. Такі точки біфуркації (ентропія досягає максимуму), передбачити неможливо. Максименко Ю.Ф продовжив вивчати це питання і виклав свої погляди у статті [1]. Він пропонував подавати ідеї у вигляді молекул, які рухаються у векторному просторі. Ідеї дозволялось додавати та віднімати. З ними пов'язана деяка міра енергетичних затрат, яка є векторною величиною. Кожна точка конфігураційного простору — місто або район, опис однієї ідеї і пов'язаний із нею вектор витрат енергетичних форм. Тепер у кожній точці треба визначити ймовірність того, що зазначений набір ознак точки реально існує. Основне завдання, яке ставилось, — досягнути такого стану, при якому ентропія суспільства буде найменшою. Шляхи досягнення мети описані досить абстрактно і призначені швидше для розгляду економістів, ніж розробників програм.

Автори статті пропонують власний підхід до подання моделі управління.

Ідеї представимо у вигляді сукупності різнотипних молекул — газу (можливо, ідеального); через об'єм певного газу позначимо затрати бюджету на реалізацію даної ідеї.

Тоді модель управління, а зокрема управління економікою, являє собою деяку геометричну фігуру, розміщену у тривимірному просторі (ми ще не обумовлюємо її форми), всередині заповнену сукупністю газів — ідей. На осях координат ми відкладатимемо витрати бюджету на різні сфери життя. Тоді вісь x характеризує економіку (витрати з бюджету на розвиток промисловості, сільського господарства, транспорту, сфери послуг та ін.), y — політику (витрати на встановлення стосунків з іншими містами, державами), z — соціальну сферу (соціальні виплати населенню — субсидії, стипендії, пенсії тощо). Проміжні точки характеризують зв'язок між економікою, політикою і соціальною сферою. Такий розподіл відбиває пріоритети сьогодення: найважливішою для розвитку суспільства є економіка, а від неї залежать політика та соціальна сфера.

Оболонка геометричної фігури — бюджет. На осях відкладаємо кошти, які витрачаються з бюджету міста на різні сфери життя.

Тоді через температуру газу позначимо прибуток від реалізації ідеї, а через об'єм — витрати на її реалізацію. Енергія у термодинамічній системі буде еквівалентом грошової маси в економічній системі. Дійсно, чим більший об'єм займає газ всередині геометричної фігури, тим більших затрат потребує реалізація ідеї, яку даний газ подає. Чим більша температура газу, тим більше енергії він може виділити у систему, тобто тим більший прибуток можна отримати завдяки цій ідеї. Зрозуміло, що через тиск тепер потрібно позначити ефективність від реалізації проекту. Тоді справджується закон Клапейрона-Менделєєва (1).

Форма геометричної фігури міняється в часі під впливом парціальних тисків газів. Це означає, що залежно від ідей, які зараз присутні, змінюється величина вкладень бюджетних коштів у економіку, політику та соціальну сферу. Чим більше визріває ідея, тим більшою стає її вага для суспільства (збільшуються парціальний тиск та маси молекул, що входять до складу газу). Ми не можемо подати бюджет у вигляді енергії, тому що за законами термодинаміки внутрішня енергія системи є сталою, а кошти у бюджеті — змінна величина. Зате подання енергії у вигляді грошової маси дає змогу задовольнити відразу два закони: закон збереження енергії (перший закон термодинаміки) та закон сталості величини грошової маси.

Ефективність ведення економічної політики залежить від ефективності запропонованих ідей, причому прибутки від їх реалізації додаються. Це аналогічно до визначення тиску системи як суми парціальних тисків газів, тобто для економічної моделі можна застосовувати формулу (2).

Через масу газу позначимо вагу ідеї для суспільства. Це поняття не є чітким. Залежно від пріоритетів і потреб міста воно може виражати:

- величину, на яку збільшились прибутки міста від реалізації ідеї;
- величину, на яку зменшились бюджетні витрати:

· величину отриманих закордонних інвестицій тощо.

Неважко показати, що при такому трактуванні маси газу справджуються закони Бойля-Маріотта, Гей-Люссака та Шарля. Звідси ми отримуємо підтвердження того факту, що маса газу (вага ідеї) залежить від тиску (ефективності), об'єму (затрат) та температури (прогнозованого прибутку від реалізації).

Якщо через газ ми позначили ідеї розвитку міста, то молекулами цього газу можна вважати варіанти реалізації ідей (вони незалежні, можуть притягуватись та відштовхуватись, мають різну масу). Чим більше варіантів реалізації має та чи інша ідея і чим вищі прибутки прогнозуються від їх реалізації, тим вищою буде ефективність проекту. Оскільки у термодинамічній системі через тиск ми позначили ефективність, а через температуру прибуток, то очевидним є виконання формули (3) і у середовищі економічних відносин.

Закони термодинаміки дають змогу визначити ентропію. Вона має властивість адитивності: ентропія системи дорівнює сумі ентропій тіл, що входять у систему. В економічній системі ми спостерігаємо аналогічну ситуацію: чим вищий ступінь невизначеності (ризик невдачі) кожної ідеї, тим вищий і ступінь невизначеності стану системи загалом; ймовірність невдачі від реалізації вибраної програми розвитку для міста є сумою ймовірностей невдачі у кожній галузі.

Принцип мінімізації ентропії впливає з припущення про існування знання, що зрушує "ймовірності" p фізично можливого стану економіки в бік нуля або одиниці (підтвердження формули (4)). Насправді, життя кожної ідеї підтримується інтересами деяких груп людей і суперечить інтересам інших груп. Внаслідок боротьби інтересів або якісь ідеї гинуть ($p \rightarrow 0$), або сполучення якихось ідей стають домінуючими ($p \rightarrow 1$).

Інтереси людей, переважно, входять у конфлікт із законами природи і ресурсними обмеженнями. Це призводить до руйнації ідей, які домінували, і появи нових, що збільшує ентропію.

При вибраному підході подання економічної моделі у вигляді термодинамічної системи підтвердження знайшли також три основні закони термодинаміки, а саме:

- закон збереження енергії — подає закон збереження грошової маси.
- будь-який необернений процес всередині замкненої системи проходить так, що ентропія системи при цьому збільшується. Прикладом таких процесів у суспільстві є страйк, який неминує призводить до збільшення невизначеності.
- ентропія усіх тіл у стані рівноваги прямує до нуля у міру наближення до нуля температури. Дійсно, чим меншою буде величина ризику при здійсненні вибору з множини неперспективних альтернатив, тим меншим буде ступінь невизначеності у суспільстві.

Відомо, що розвиток в економічній системі проходить циклічно. Ці цикли давно відомі і добре описані у літературі. Щось подібне можна спостерігати і в термодинамічній

системі: процеси розширення газу відповідають хвилі піднесення та збільшення ділової активності, а процеси стиснення — спаду.

Але при такому поданні моделі управління виникають запитання, на які, на жаль, важко знайти відповідь:

1. Як змінюватимуться властивості газу у процесі “визрівання” ідеї.
2. Як показати вибір варіанта реалізації ідеї (газ вироджується в одну молекулу?).
3. Де є джерело ідей?
4. Якщо найбільша стійкість системи досягається за умови повного хаоса ([7]), то навіщо людству розвиватись (тобто поняття держави, науки, культури стають непотрібними)?

Отже, підсумуємо досягнуті результати.

- Модель управління містом може бути подана у вигляді термодинамічної системи.
- Між основними параметрами обох систем існує біективне відображення.
- Не всі процеси, що відбуваються у суспільстві, знайшли своє відображення у термодинамічній системі.

Підхід, що становить тему цієї статті, дозволяє задовольнити більшість вимог для створення адекватної моделі управління містом, але вимагає ще докладного вивчення.

Наявність паралелей між обома системами дає змогу говорити про можливість створення інтелектуальної системи підтримки процесу прийняття рішення у економічній системі. Вона б підвищила якість прийнятих рішень і, можливо, допомогла уникнути деяких помилок при виборі найкращих альтернатив. Запровадження такої системи також би дозволило зменшити витрати на утримання апарату службовців, тому що вона може замінити експертів у керуванні різними галузями економіки.

Розглянемо основні етапи реалізації даного підходу.

1. Будуємо макромодель економіки.

Мається на увазі визначення основних напрямків розвитку суспільства — ідей. Ними можуть бути вкладення інвестицій, розвиток певної галузі, кредити в іноземних організацій тощо. За результатами опитувань експертів визначаються основні параметри ідей (витрати на, під час і після впровадження ідеї; строки виконання проекту; очікуваний прибуток). Отримані в експертів знання (модель економіки) подаємо у вигляді термодинамічних параметрів, використовуючи наведені вище паралелі.

2. Застосовуємо закони термодинаміки. У процесі моделювання визначаємо, як вплине ця ідея на розвиток економіки загалом, тобто як зміняться:

- а) обсяг випуску продукції у інших галузях,
- б) величина транспортного потоку,
- в) інші невиробничі галузі,

г) розмір закордонних інвестицій тощо.

3. Результати прогнозування знову подаються у вигляді економічних понять, аналізуються і передаються на розгляд експертів для прийняття останніми управлінських рішень. Результати можуть бути подані у вигляді:

- графіків чи гістограм, на яких відтворено порівняння ідей за різними параметрами;
- процентних відношень;
- переваги ідеї у кожній з галузей економіки.

Отже, модель економіки, яка може бути отримана на основі термодинамічної системи, є експертною системою підтримки прийняття рішень і може бути розв'язана за допомогою комбінації математичних методів прийняття рішень (розподіл ресурсу, узгодження інтересів) та використання базових термодинамічних законів.

Найбільшою проблемою при створенні такої системи є підбір експертів — справжніх фахівців у цій сфері, які б могли охарактеризувати стан економіки загалом.

Для кращого розуміння ідеї розглянемо приклад словесного моделювання економічної системи.

Як ідеї візьмемо *розвиток харчової промисловості та залучення іноземних інвестицій*. Варіанти реалізації першої ідеї:

- закупівля іноземного обладнання та самостійний випуск продукції на теренах нашої держави (параметри m_1, p_1, T_1, V_1);
- укладення договорів з іноземними фірмами та спільний випуск продукції (m_2, p_1, T_1, V_1).

У виборі альтернатив до другої ідеї визначальну роль відіграють: процентна ставка, строки позики, умови повернення тощо. Нехай є два варіанти:

- низька процентна ставка та короткострокова позика (m_{21}, p_2, T_2, V_2);
- висока процентна ставка, зручні умови повернення боргу (m_{22}, p_2, T_2, V_2).

Використовуючи знання експертів, визнаємо, яких затрат потребує розвиток кожного з цих напрямів (первинні інвестиції і потреба у інвестиціях після впровадження, чи можливим є використання самоокупних механізмів, ймовірнісні стани), величину грошової маси та ін. Визначаються також строки реалізації проекту. Прогнозуємо стан економіки при використанні цих ідей за допомогою термодинамічних законів. Для цього ми порівнюємо маси молекул, застосовуємо закон збереження енергії та зменшення ентропії. Переводимо отримані результати в економічні терміни.

Наприклад, для першої ідеї ми можемо отримати таку ситуацію.

Зросла якість транспортної системи. Як наслідок, покращився стан доріг. Все це разом привело до збільшення припливу іноземних туристів. Збільшились обсяги постачання закордонної сільськогосподарської продукції (це — наслідок того, що наші

постачальники підвищили ціни). У сільському господарстві рівень прибутків знизився на 11%. Рівень безробіття впав на 10%. Стан у важкій промисловості не змінився.

Результатом запровадження другої ідеї є

Підвищення обсягів продажів вітчизняної харчової продукції за рахунок підтримки свого виробника. Зниження рівня безробіття на 4 %. Збільшення величини державного боргу.

Порівнюємо результати двох ідей за їх впливом на кожен галузь господарства.

1. Максименко Ю. Ф. *Экономический путь России (немонетарный анализ)*. Московский центр непрерывного образования взрослых. М., 1998. 2. Н. Н. Моисеев *Математические задачи системного анализа*. М., 1981. 3. Конюховский П. В. *Математические методы исследования операций в экономике*. М., 1999. 4. Трофимова Т. И. *Курс физики: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.* М., 1990. 5. *Обзор исследований по построению макроэкономических моделей*. Центр экономических исследований Республики Узбекистан, Ташкент, 1999. 6. *Основы математической экономики. Учебник по математической экономике с теорией и задачами* Данилов Н.Н., Иноземцева Л. П., М., 1998. 7. И. Пригожин, И. Стенгерс *Порядок из хаоса*. М., 1986.