УДК 621.39 (075)
doi:10.18720/SPBPU/2/id24-144

***Костюковский Алексей Григорьевич*,**
канд. техн. наук, доцент

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ НАЦИОНАЛЬНОЙ МАКРОЭКОНОМИКИ В ФОРМЕ I-СЕТИ

Беларусь, Минск, УО «Белорусская государственная академия связи»,
alexsey48@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-8076-2122

***Аннотация*.** В статье рассматривается актуальная проблема моделирования последствий определенных социальных, экономических и политических стратегий и политики как открытой системы. Построена сеть влияния на орграфе простой модели национальной макроэкономики США в форме I-сети. Проведено моделирование и сравнение двух различных алгоритмов эмерджентности сходимости весов ребер орграфа к странному аттрактору сети на примерах известного эвристического алгоритма Льюиса и авторского. Показано, что авторский алгоритм приводит к значительному сокращению количества циклов авторской программы “Influence” при значительном уменьшении ошибки ε, когда в рамках одного практического занятия можно осуществлять образовательный процесс студентов, одновременно приобщая их к научно-исследовательской работе.

Ключевые слова: власть в сети, вычислительный эксперимент, матрица власти, матрица влияния, орграф, предпочтительный рост, влияние актера в сети, странный аттрактор сети, условие устойчивости сети, эмерджентность сети.

***Alexey G. Kostukovsky*,**
Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor

A SIMPLE MODEL OF NATIONAL MACROECONOMICS IN THE FORM OF I-NETWORK

Educational Establishment “Belarusian State Academy of Telecommunications”, Minsk, Belarus,
alexsey48@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-8076-2122

***Abstract*.** The article deals with the actual problem of modeling the consequences of certain social, economic and political strategies and policies as an open system. An influence network is built on the digraph of a simple model of the US national macroeconomics in the form of an I-network. Modeling and comparison between two algorithms for the emergence of convergence of weights of digraph edges to a strange attractor of a network is carried out using the examples of the well-known Lewis heuristic algorithm and the author’s algorithm. It is shown that the author’s algorithm leads to a significant reduction in the number of cycles of the author’s program “Influence” with a significant decrease in the error, when within the framework of one practical lesson it is possible to carry out the educational process of students, at the same time involving them in research work.

Keywords: power in a network, computational experiment, power matrix, influence matrix, digraph, preferred growth, actor's influence in a network, strange network attractor, network stability condition, network emergence.

Введение

Сеть влияния — I-сеть — это сеть, $G = \{N, M, f\}$, содержащая узлы N, ориентированные и неориентированные взвешенные связи M, а также отображающую функцию, которая определяет топологию сети как f: $N \times N$.

Поскольку сети влияния являются превосходными моделями *социальных сетей*, то узлы называют также *актерами*. Узлы и связи имеют характерное значение, которое определяет *влияние* (для связей) и *положение* (для узлов), связанное с *суждением*. Например, вопрос о высшей мере наказания является суждением, положением каждого узла является или *за*, или *против*, а связь e: $\upsilon \to u$ определяет *степень влияния* ϕ, что актер υ имеет влияние на положение актера u. Как правило, вес (ориентированной) связи e равен ее *степени влияния*, ϕ равен влиянию (ям), и является долей от нуля (никакого влияния) до единицы (100 % влияния). В теории, развитой здесь, влияние будет только положительным, $0 \le \phi \le 1$, начиная с нуля до полного контроля.

Сети влияния могут моделировать последствия определенных социальных, экономических и политических стратегий и политики. Например, предположим, что сеть влияния используется, чтобы моделировать национальную экономику. Один узел может представлять налоги, а другие могут представлять потребителей, занятость и государственные расходы. Связи (влияния) представляют последствия общего роста налогов или снижения потребительских расходов, государственных расходов и так далее. Каждый узел в этой сети влияет на смежные узлы через взвешенные связи. Например, снижение налогов могло бы увеличить уровень занятости. А уровень занятости в свою очередь увеличивает потребительские расходы, которые в свою очередь увеличивают налоговые поступления, которые в свою очередь могли бы привести к другому снижению налогов. Учитывая такую сеть влияния, степень влияний ϕ (значения связи) и исходные положения каждого актера, мы могли бы спросить: «Каковы последствия роста налогов на потребительские расходы?» Ответ происходит из исследования устойчивого «выхода» от этой сети влияния. Например, достигают ли состояния актеров устойчивого значения, или же они колеблются? Конечное состояние такой сети может быть прослежено до влияний, которые актеры имеют на других актеров, и топологии сети.

Теория сети влияния имеет много очень важных применений, которые мы подробно рассмотрим при дальнейшем развитии теории сети влияния. Эта теория основана на теории устойчивости сети. *Устойчи-*

вость представляет термин, используемый нами, чтобы описать узлы и сети, которые восстанавливаются после разрушений своих состояний.

Говорят, что динамическая сеть *синхронизируется*, если, начиная с некоторого начального состояния $G(0)$, она развивается за конечное время в другое состояние, $G(t^*)$, и остается там навсегда. Мы называем $G(t^*)$ *странным аттрактором*, и если сеть остается в точке ее странного аттрактора бесконечно, то она становится также *неподвижной точкой*.

Для G, чтобы достигнуть неподвижной точки, состояние каждого узла (и связи) в G должно сделать то же самое — исходя от начального состояния $s_i(0)$, каждый узел $i = 0, 1, 2, \ldots, n - 1$, должен достигнуть конечного состояния $s_i(t^*)$ и остаться там, приводя сеть к синхронизации. Бистабильный узел чередуется между состояниями, а неустойчивый узел «расходится» — его состояние становится неограниченным, или принимает, казалось бы, случайные значения. Мы называем эти неустойчивые состояния хаотическими, даже притом, что они часто повторяют ту же самую последовательность значений состояния без конца.

Изменения состояний от $s_i(0)$ к $s_i(1), s_i(2), \ldots, s_i(t^*)$ формирует *траекторию* в пространстве состояний, определенной вычерчиванием кривой $s_i(t + 1)$ вдоль вертикальной оси, и $s_i(t)$ вдоль горизонтальной оси хаотической карты. *Хаотическая карта* это просто график траектории узла в пространстве состояний. *Устойчивый узел* притягивается к своей неподвижной точке, независимо от своей исходной точки.

Если устойчивость становится проблемой, то какие условия гарантируют устойчивость? Мы утверждаем, что устойчивость представляет состояние синхронизации, а хаос есть состояние неустойчивости — то есть, сеть является устойчивой, если ее узлы синхронизированы (все достигают своих значений странных аттракторов), и либо бистабильной, или хаотической в противном случае. Условия, которые гарантируют синхронизацию, являются теми же самыми, как и условия, которые гарантируют устойчивость [1].

1. Согласие I-сети

Анализ социальной сети — это изучение принципов власти в сетях, но есть много различных определений социальной власти, используемых в литературе [2–9]. Мы решили определять *социальную власть*, как совокупность влияния некоторого актера над окончательным (странного аттрактора) значением синхронизированной сети. Социальная власть может быть аппроксимирована асимптотическим решением уравнения состояния, когда время стремится к бесконечности:

$$S(t + 1) = S(t) + \mathbf{L}S(t) = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]S(t),$$

поэтому

$$S(t) = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]^t S(0); \; t = 1, 2, \ldots, \tag{1}$$

где $S(0)$ — начальные условия весов ребер в G,

I — единичная матрица,

L — лапласиан транспонированной матрицы влияния $\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}$, полученной из матрицы смежности орграфа G.

Пусть **Q** будет *матрицей власти*, соответствующая влиянию каждого актера на конечное состояние (согласие) I-сети. **Q** — матрица состояний системы, возведенной к некоторой «большой» власти. Поскольку время t неограниченно возрастает, и если спектральный промежуток $\sigma(\mathbf{L}) < 0$, где σ — наибольшее нетривиальное собственное значение **L**, то $S(t)$ сходится к странному аттрактору:

$$s(\infty) = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{\infty} S(0).$$

Но мы не можем вычислять бесконечно и бесконечность, поэтому мы аппроксимируем ее конечной величиной t^* следующим образом:

$$\mathbf{RMS}([\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{t^*}) < \varepsilon, \qquad (2)$$

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{t^*}, \qquad (3)$$

где величина ошибки ε, как правило, равна 0,0001.

Функции **RMS**() — root-mean-square — определяется как среднеквадратичная ошибка, полученная путем вычитания диагонального элемента каждого столбца **Q** из любого другого элемента столбца, возведения в квадрат разности, суммирования, а затем взятия квадратного корня из суммы как:

$$\mathbf{RMS}(X) = \sqrt{\sum \left(x_{i,j} - x_{i,j}\right)^2}\ . \qquad (4)$$

2. Эмерджентность веса

Общая идея об эмерджентности веса состоит в том [10], чтобы увеличивать веса исходящих связей для роста влияния актера на своих исходящих соседей, и уменьшать веса входящих связей для минимизации влияния других актеров на (амбициозного) актера. Этот подход имеет смысл, если рассматривают матрицу влияния $\boldsymbol{\phi}$. Строка i из $\boldsymbol{\phi}$ представляет влияние актера i над другими актерами, а столбец j представляет влияние, которое другие актеры навязывают актеру i. Очевидно, что увеличение суммы ряда i и уменьшение суммы столбца j имеет для актера i два преимущества: (a) это увеличивает полное влияние, которое актер i навязывает на своих соседей, и (b) это уменьшает полное влияние, навязываемое актеру i другими актерами. Оба действия увеличивают степень влияния актера i.

Проблема увеличения суммы строки с одновременным уменьшением суммы столбца матрицы $\boldsymbol{\phi}$ довольно очевидна — это антагонистические действия. Уменьшение суммы столбца также уменьшает сумму строки, и наоборот, увеличение суммы строки также увеличивает сумму столбца. Мы не можем делать и то, и другое одновременно. Предлагаемая стратегия становится математически бессмысленной.

Вместо того чтобы самим аналитически разрешать этот парадокс, пусть за нас сама I-сеть найдет решение путем процесса эмерджентности. Вместо того чтобы писать некоторое уравнение, мы предлагаем написать простые микроправила для каждого актера, согласно которым он должен самостоятельно следовать, а потом наблюдать за результирующим макросвойством, возникающим из сотен применений микроправил. I-сеть будет либо сходиться, либо расходиться. Если она сходится, степени влияния (частично) устойчивых актеров отвечают на вопрос: «Кто является наиболее влиятельным актером в I-сети?» Алгоритм эмерджентности веса прост: выберем две (строка, столбец) случайных пары из матрицы влияния ϕ, соответствующие входящей связи и исходящей связи актера #row. Затем вычтем один пункт веса из входящей связи и добавим один пункт к исходящей связи. Если условия являются правильными, то приращение измененного веса входящей и исходящей связей приводит к увеличению степени влияния случайно выбранного актера, но если нет, то мы возвращаемся к предыдущим весам. Этот процесс повторяется, пока степени влияния всех актеров остаются (относительно) устойчивыми — но, возможно, отличающимися друг от друга.

3. Постановка задачи

Известно два алгоритма эмерджентности весов ребер орграфа сети: эвристический алгоритм Льюиса [11], который работает довольно надежно в обход пока еще неизвестного достаточного условия устойчивости сети, и нижеприведенный авторский, который работает довольно надежно с использованием необходимого и достаточного Костюковского условия устойчивости сети влияния [1].

Вычислительные эксперименты с использованием эвристического алгоритма Льюиса проводились на простой модели национальной макроэкономики США в форме I-сети, записанной на языке программирования Python 3 в авторском программном обеспечении (ПО) “Influence”. Результаты показывали значительное увеличение количества циклов вычислительного эксперимента (с 10704 до 205930) с ростом точности вычисления **RMS**() при понижении ошибки со значения $\varepsilon = 0.9$ до величины $\varepsilon = 0,6$. Достигалось также и снижение ошибки до порога $\varepsilon = 0.5$, ниже которого сеть теряла устойчивость. Причем за время практического занятия (2 академических часа) обретать статистически значимых результатов не получалось, так как при количестве циклов $i = 1000000$, время выполнения программы “Influence” возрастает до 2,5 ч. Но требуется несколько десятков миллионов таких циклов.

Возникает задача в разработке такого алгоритма эмерджентности I-сети, который бы приводил к значительному сокращению количества циклов программы при значительном понижении ошибки ε. Такой алгоритм, который позволил бы сократить многомашинное время для надежной эмерджентности орграфа в форме I-сети без вхождения в бесконечный цикл. И чтобы в рамках одного практического занятия можно было бы привлекать студенческую аудиторию к научной работе по достижению необходимой точности расчетов **RMS**() в процедуре проведения вычислительных экспериментов с различными начальными условиями.

4. Методика решения задачи

Известно необходимое и достаточное Костюковское условие устойчивости сети влияния [1]: *необходимыми условиями устойчивости* орграфа G в форме I-сети являются не превышение единицы, как суммы весов входящих связей, так и суммы весов исходящих связей в каждом его узле, соответственно. Тогда, сумма по каждой строке i и по каждому столбцу j матрицы влияния $\boldsymbol{\phi}$ орграфа G, соответственно, должна попадать в интервал веса от нуля до единицы включительно: $\Sigma\phi_i \in [0, 1]$, $\Sigma\phi_j \in [0, 1]$. *Достаточными условиями устойчивости* орграфа G в форме I-сети являются отрицательность спектрального промежутка $\sigma(\mathbf{L})$ лапласиана $\mathbf{L}$ транспонированной матрицы влияния $\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}$ орграфа G, полученной из его матрицы смежности: $\sigma(\mathbf{L}) < 0$.

Вышеприведённая формулировка Костюковского условия устойчивости сети влияния послужила основой для создания нижеприведённого Костюковского алгоритма эмерджентности сети влияния [1]:

1. Случайно выберите связь, соединяющую актера $\#row_1$ с некоторым входящим актером, а вторую связь с некоторым исходящим актером:

   Исходящая связь: $row_1 \to col_1$,

   Входящая связь: $row_2 \to col_2$.

2. Сохраните копии весов входящих и исходящих связей в случае, если условия для их изменения являются ошибочными.

3. Вычислите среднеквадратичную ошибку $\mathbf{RMS}()_i$.

4. Если вес исходящей связи ≤ 99 %, то увеличьте вес исходящей связи на 1 %.

5. Если вес входящей связи ≥ 1 %, то уменьшите вес входящей связи на 1 %.

6. Вычислите входящие и исходящие общие суммы при суммировании строк и столбцов матрицы влияния ϕ:

   Общая сумма входящих $= \sum_r \phi(r, col_2)$,

   Общая сумма исходящих $= \sum_c \phi(row_1, c)$.

7. Если общая сумма исходящих $>$ 100 %, то вернитесь к сохраненным весам (*необходимое условие устойчивости*).

8. Если общая сумма входящих > 100 %, то вернитесь к сохраненным весам (*необходимое условие устойчивости*).

9. Вычислите матрицу лапласиана $\mathbf{L}$.

10. Вычислите спектральный промежуток $\sigma(\mathbf{L})$ матрицы лапласиана $\mathbf{L}$.

11. Если спектральный промежуток $\sigma(\mathbf{L}) \geq 0$, то вернитесь к сохраненным весам (*достаточное условие устойчивости*).

12. Повторно вычислите степень влияния, $\mathbf{Q} = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{t^*}$, и проверьте ее на конфликты.

13. Если будет найден конфликт $C < 0$, то вернитесь к сохраненным весам.

14. Повторно вычислите среднеквадратичную ошибку $\mathbf{RMS}()_{i+1}$.

15. Если среднеквадратичная ошибка $\mathbf{RMS}()_i < \mathbf{RMS}()_{i+1}$, то вернитесь к сохраненным весам.

Рассмотрим простую модель национальной макроэкономики США и выполним на ней вычислительный эксперимент, используя разработанную нами программу “Influence” согласно *Костюковскому алгоритму эмерджентности сети влияния*, приведённому выше и записанному на высокоуровневом языке программирования общего назначения — Python 3. На рисунке 1 представлена упрощенная модель национальной макроэкономики США [11] как орграфа G в форме I-сети.

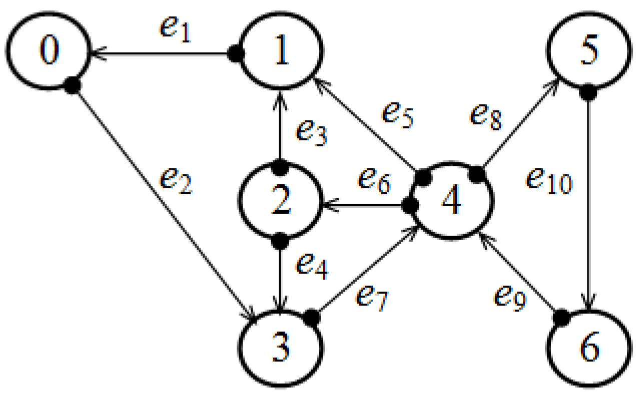

Рис. 1. Упрощенная модель национальной макроэкономики США как орграфа G в форме I-сети:
0 — Правительственные расходы (следует прибегать к краткосрочным заимствованиям, когда процентные ставки высоки, и к долгосрочным, когда процентные ставки низки);
1 — Налоги; 2 — Корпоративная прибыль; 3 — Службы (занятость населения);
4 — Потребительские расходы (общие расходы домохозяйств на потребительские услуги и товары; представляют собой часть национального продукта);
5 — Процентные ставки; 6 — Стоимость национальной валюты

Подытожим важнейшие свойства социальной сети, представленной на рисунке 1, как вектор начального состояния $S(0)$ и матрица влияния $\boldsymbol{\phi}$, которую мы получаем из матрицы смежности и затем транспонируем как:

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_3 & 0 & e_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_7 & 0 & 0 \\ 0 & e_5 & e_6 & 0 & 0 & e_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_9 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \; \boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 0 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 & 0 & e_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_6 & 0 & 0 \\ e_2 & 0 & e_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_7 & 0 & 0 & e_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{10} & 0 \end{pmatrix}.$$

I-сеть синхронизируется, если уравнение состояния, $\Delta S(t) = \mathbf{L}S(t)$, имеет отрицательные собственные значения — то есть, отрицательный *спектральный промежуток* $\sigma(\mathbf{L}) < 0$, который является достаточным, но все же не необходимым условием, чтобы гарантировать устойчивость I-сети.

Преобразуем транспонированную матрицу влияния $\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}$ в матрицу лапласиана $\mathbf{L}$ путем вставки сумм строк в диагональные элементы как:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} -e_1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(e_3 + e_5) & e_3 & 0 & e_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e_6 & 0 & e_6 & 0 & 0 \\ e_2 & 0 & e_4 & -(e_2 + e_4) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_7 & -(e_7 + e_9) & 0 & e_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_8 & -e_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{10} & -e_{10} \end{pmatrix}.$$

Тогда $\mathbf{Q} = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]$ будет *матрицей власти*, соответствующая влиянию каждого актера на конечное состояние (согласие) I-сети:

$$
\mathbf{I}+\mathbf{L}=\begin{pmatrix}
1-e_1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1-(e_3+e_5) & e_3 & 0 & e_5 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1-e_6 & 0 & e_6 & 0 & 0 \\
e_2 & 0 & e_4 & 1-(e_2+e_4) & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & e_7 & 1-(e_7+e_9) & 0 & e_9 \\
0 & 0 & 0 & 0 & e_8 & 1-e_8 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{10} & 1-e_{10}
\end{pmatrix},
$$

$$
\mathbf{Q} = [\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{t^*}.
$$

Диагональ матрицы власти **Q** представляет собой *степень конфликта С*, как свойство некоторого актера, который мешает достижению согласия в I-сети, срывая ее синхронизацию:

$$
C = [1- e_1, 1- (e_3 + e_5), 1- e_6, 1- (e_2 + e_4), 1- (e_7 + e_9), 1- e_8, 1- e_{10}]^{\mathrm{T}}.
$$

Положительная степень конфликта приводит к положительному согласию, в то время как отрицательная степень согласия ведет к безвыходному положению. Актер становится *противоречащим*, если его степень конфликта отрицательна. Когда I-сеть содержит противоречащего актера, состояния всех актеров колеблются вниз до достижения нуля. Это состояние не предоставляет позиции для актеров. Диагональные элементы C, $c_i = 1, 2, \ldots, n$, являются мерами степени конфликта, введенного в сеть актером υ_i. Когда $c_i < 0$, мы наблюдаем отрицательный конфликт, который производит воздействие ослабления на согласие. Таким образом, единственный актер с отрицательной степенью конфликта будет преобладать над воздействиями всех других влияний, что лишает актеров возможности договариваться в ненулевой позиции.

Причем отрицательный результат отрицательного конфликта сразу вырисовывается в топологии сети. Этот эффект зарегистрирован в системной матрице C. Пусть степень конфликта равна диагонали C матрицы власти **Q**. Диагональные элементы C, $c_i = 1, 2, \ldots, n$, являются мерами степени конфликта, введенного в сеть актером υ_i. Когда $c_i < 0$, мы наблюдаем отрицательный конфликт, который производит воздействие ослабления на согласие.

Поэтому, странный аттрактор некоторой I-сети, содержащей, по крайней мере, одну отрицательную степень конфликта, приводит к нулю. Мы называем актера υ_i, соответствующего $c_i < 0$, *противоречащим*, и объявляем, что I-сеть поставлена в *безвыходное положение*. Все противоречащие актеры должны быть ликвидированы до того, как I-сеть может достичь согласия!

При этом проверяется необходимое [1] и достаточное Костюковское условие устойчивости сети влияния: $\sigma(\mathbf{L}) < 0$. Кроме того, мы также обратили внимание на тот факт, что циклы повторялись до заданного порога ошибки ε, что позволило нам ввести микроправило случайного выбора таких пар весов ребер орграфа, которые приводили бы к целенаправленному снижению среднеквадратичной ошибки **RMS**() в каждом цикле авторского ПО “Influence”.

Процесс эмерджентности согласно авторскому алгоритму завершается, когда среднеквадратичное значение $\mathbf{RMS}([\mathbf{I} + \mathbf{L}]^{t^*})$ становится меньше предустановленной ошибки ε, где, как правило, ошибка ε устанавливается равной величине 0,0001.

Язык программирования Python 3 выбран потому, что он является высокоуровневым языком программирования общего назначения с динамической строгой типизацией и автоматическим управлением памятью, ориентирован на повышение производительности разработчика, читаемости кода и его качества, а также на обеспечение переносимости написанных на нём программ. Язык является полностью объектно-ориентированным в том плане, что всё является объектами. Синтаксис ядра языка — дружественный разработчику, за счёт чего на практике редко возникает необходимость обращаться к документации. Сам же язык известен как интерпретируемый и используется, в том числе для написания скриптов.

Веса ребер орграфа G в ходе многократного выполнения вычислительного эксперимента согласно авторскому ПО “Influence” по циклам i распределились так, как показано в таблице 1, где начальные условия $S(0)$ заданы как: $e_1 = 0.06$, остальные веса ребер установлены одинаковыми и равными 0,2.

Из таблицы 1 следует, что весовые коэффициенты ребер орграфа изменяются незначительно при схождении к странному аттрактору сети. Более того, при этом было установлено, что весовые коэффициенты ребер орграфа практически не зависят и от начальных условий $S(0)$. Количество циклов в вычислительных экспериментах не превышает величины $i = 10000$. Что позволяет привлекать студенческую аудиторию к научной работе по достижению необходимой точности расчетов RMS() в процедуре проведения вычислительных экспериментов с различными начальными условиями в рамках одного практического занятия.

Таблица 1

Распределение весов ребер орграфа в ходе вычислительных экспериментов

$S(0)$ / RMS()	e_2	e_1	e_3	e_4	e_7	e_5	e_8	e_6	e_{10}	e_9	i
	0.2	**0.06**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	**0.2**	
0.294	0,47	0,45	0,46	0,47	0,14	0,19	0,34	0,46	0,59	0,50	4785
	0,49	0,42	0,46	0,46	0,13	0,20	0,33	0,46	0,58	0,51	6530
	0,48	0,44	0,47	0,47	0,13	0,20	0,34	0,45	0,58	0,51	6462
	0,49	0,42	0,48	0,47	0,14	0,19	0,35	0,45	0,58	0,50	5264
	0,49	0,42	0,47	0,48	0,12	0,21	0,34	0,44	0,58	0,52	4992
	0,47	0,44	0,46	0,46	0,16	0,18	0,35	0,46	0,58	0,49	4363
	0,48	0,43	0,46	0,46	0,15	0,20	0,33	0,46	0,59	0,46	5785
	0,48	0,43	0,46	0,46	0,15	0,20	0,33	0,46	0,59	0,49	5829
	0.48	0,44	0,47	0,46	0,15	0,19	0,34	0,46	0,58	0,50	8796
	0,47	0,44	0,47	0,46	0,15	0,18	0,35	0,46	0,59	0,49	5484

Изменение уровня квантования весов ребер орграфа с $\Delta = 0{,}01$ до $\Delta = 0{,}001$ сопровождались значительным ростом количества циклов (до 15000000), но не приводили к снижению порога **RMS**(), равного 0,294. I-сеть теряла устойчивость с порогом **RMS**() < 0.294, как и в случае использования эвристического алгоритма Льюиса с порогом **RMS**() < 0,6 [1].

На рисунке 2 представлены результаты наиболее представительных экспериментов, осуществленных согласно авторскому алгоритму.

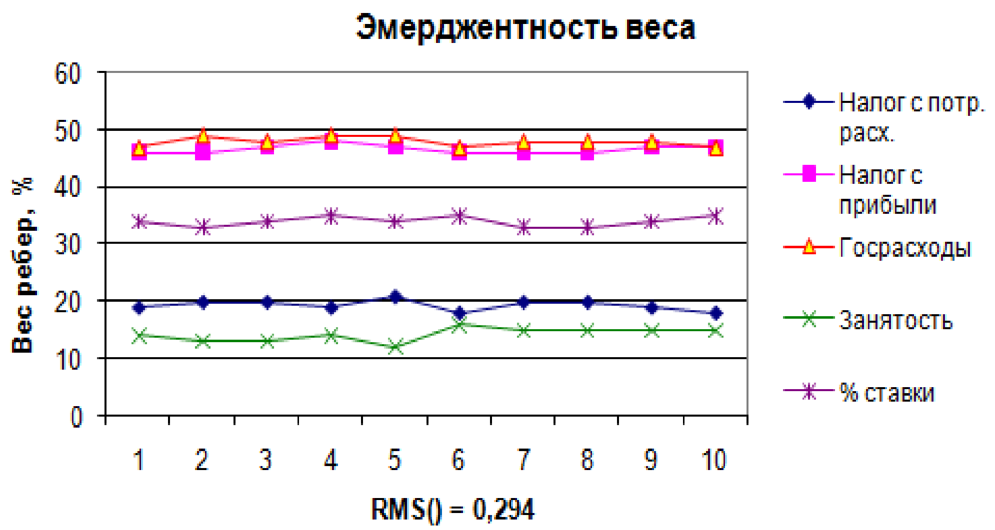

Рис. 2. Результаты вычислительных экспериментов

Как следует из рисунка 2, налоги на потребительские расходы связаны прямой корреляционной зависимостью с госрасходами и обратной корреляционной зависимостью с занятостью населения и процентными ставками. То есть с увеличением налога на потребительские расходы растут и госрасходы, а занятость населения и процентные ставки падают в пределах, приведенных в таблице 1 и показанных на рисунке 2.

5. Анализ полученного результата

Отметим, что невозможность достижения различными вышеуказанными алгоритмами заданной ошибки ε, равной 0.0001, вызвана, скорее всего, несовершенством модели макроэкономики — топологией ее *I*-сети, представленной на рисунке 1.

К сожалению, теория сетей хоть и способна производить анализ, но ещё не в состоянии производить синтез таких моделей, поскольку в рамках теории сетей имеется только инструмент эмерджентности связи, который, как показано в [11], чаще приводит к хаосу. Что касается порождающих процедур конструктора сетей (Гильберта, Эрдёш-Реньи, процедура Watts-Strogatz, производство безмасштабной сети, процедура Molloy–Reed, порождающая процедура Михаила и т. д.), то они не способны заменить собой экономиста грядущего нового валютного мира, где *бытие* есть обмен веществ, *энергии жизни* и информации в открытой системе макроэкономики.

Таким образом, возникает необходимость в синтезе модели национальной макроэкономики, как *открытой системы* грядущего нового валютного мира с применением закономерностей теории систем, где «Понятие «открытой системы» ввел Л. фон Берталанфи, основной концепцией которого является *организмический подход* к биологическим и социальным объектам и явлениям. Открытой названа система, постоянно обменивающаяся веществом, энергией и информацией с внешней средой» [12, с. 95].

Заключение

В статье рассматривается актуальная проблема моделирования последствий определенных социальных, экономических и политических стратегий и политики как открытой системы. Построена сеть влияния на орграфе простой модели национальной макроэкономики США в форме I-сети. Проведено моделирование и сравнение двух различных алгоритмов эмерджентности сходимости весов ребер орграфа к странному аттрактору сети на примерах известного эвристического алгоритма Льюиса и авторского. Показано, что авторский алгоритм приводит к значительному сокращению количества циклов авторской программы “Influence” при значительном уменьшении ошибки ε, когда в рамках одного практического занятия можно осуществлять образовательный процесс студентов, одновременно приобщая их к научно-исследовательской работе.

Список литературы

1. Костюковский, А. Г. Необходимое и достаточное условие устойчивости орграфа I-сети [Электронный ресурс] // Стратегии развития современной науки / Выдавецтва «Навуковы свет», Научно-издательский центр «Мир науки». – Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2023. – С. 7–25, ID: 50745405.

2. Wang X., Chen G. Pinning control of scale-free dynamical networks // Physica A. –2002. – Vol. 310. – Pp. 521–531.

3. Wang X., Chen G. Synchronization in small-world dynamical networks // J. Bifurcation Chaos. 2002. – Vol. 12(1). – Pp. 187–192.

4. Bonacich P. Factoring and weighing approaches to clique identification // J. Math. Sociol. – 1972. – Vol. 2. – Pp. 113–120.

5. Newman M.E.J., Watts D.J., Strogatz S.H. Random graph models of social networks // Proc. Natl. Acad. Sci. USA 99(Suppl. 1):2566–2572 (2002).

6. Newman, M. E. J., The structure and function of complex networks // SIAM Rev. Soci. Industr. Appl. Math. – 2003. – Vol. 45(2). – Pp. 167–256.

7. Liu J., Yu X., Chen G. Chaos synchronization of general complex dynamical networks // Physica A. – 2004. – Vol. 334. – Pp. 281–302.

8. Lu J., Yu X., Chen G., Cheng D. Characterizing the synchronizability of small-world dynamical networks // Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions. – 2004. – No. 51. – Pp. 787–796. – DOI: 10.1109/TCSI.2004.823672.

9. Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F. Evolution of networks – from biological nets to the Internet and WWW. – Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 2003. – 264 p. – DOI: 10.1063/1.1825279.

10. Костюковский А.Г., Костюковский И.А. Устойчивость иерархии команды // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XX Междунар. науч.-практ. конф., 29 июня – 1 июля 2016 г., Санкт-Петербург, Россия. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 89–93, ID: 26506303.

11. Lewis T.G. (Theodore Gyle) 1941- Network science: theory and practice. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. (Published simultaneously in Canada), 2009. – 513 p. – DOI: 10.1002/9780470400791.

12. Волкова В.Н., Черный Ю.Ю. Закономерности информационных процессов в открытых системах // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XX Междунар. науч.-практ. конф., 29 июня – 1 июля 2016 г., Санкт-Петербург, Россия. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 94–107, ID: 26506304.