

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОСНОВНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОСУДАРСТВА ПОД ВЛИЯНИЕМ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Дранко О.И., Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Степановская И. А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

olegdranko@gmail.com, tsvirkun@ipu.rssi.ru, rw4cy@mail.ru, irstepan@ipu.ru,

Богомолов А.С., Кушников В.А., Иващенко В.А.

*Институт проблем точной механики и управления РАН,
Россия, г. Саратов, ул.Рабочая, д.24*

bogomolov@iptmuran.ru, kushnikoff@iptmuran.ru, ivaipmtmu@iptmuran.ru,

Безродный А.А.

*Белорусский государственный университет,
Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д.4
bezrodnyaa@yandex.ru*

Аннотация. Исследование направлено на разработку моделей, методов и алгоритмов, позволяющих определить рациональные мероприятия по развитию водородной энергетики в условиях значительного и разнонаправленного её влияния на основные экономические показатели государства. Разработанная концепция предполагает использование системно-динамических моделей, характеризующих связи основных показателей экономического развития государств и развития водородной энергетики. В поставленной вариационной задаче нужно определить управляющие воздействия, минимизирующие взвешенное суммарное отклонение основных экономических показателей от требуемых или ориентировочных значений. В задачу входит система разностных уравнений, описывающая взаимосвязанную динамику рассматриваемых показателей, ограничения, связанные с ресурсами и целями функционирования системы и граничные условия. Задача решается путем выбора подмножества вариантов решений и соответствующих им управлений, удовлетворяющих условиям и затем выбора управляющего воздействия, минимизирующего целевую функцию. Этому воздействию соответствуют сценарии и планы мероприятий, позволяющие снизить отклонение основных экономических показателей от требуемых или ориентировочных значений в ходе развития водородной энергетики государства.

Введение

В настоящее время значительное развитие получили новые способы повышения энергоэффективности промышленности, основанные на использовании водородной энергетики. Переход на водородную энергетику позволяет значительно уменьшить затраты на энергоемкое промышленное производство, снизить количество вредных атмосферных выбросов. Сейчас доля электроэнергии, которая вырабатывается в Европе возобновляемыми источниками, составляет около 33%. Страны Евросоюза планируют к 2050 году перейти к «климатически нейтральному» способу добычи энергии, при котором не будут использоваться нефть, газ и уголь. Данная тенденция связана в первую очередь со стремлением снизить неблагоприятное влияние на климат. При этом интенсификация развития водородной энергетики потребует значительного расхода природных, человеческих и технических ресурсов, из-за чего разнонаправлено повлияет на экономические показатели развития стран. Поэтому появляется значительное число исследований, посвященных контролю и оптимизации этого процесса. Как показывает обзор множества международных публикаций, в настоящее время математические модели и методы применяются в основном для решения локальных вопросов, связанных с организацией внедрения и развития водородной энергетики. Так, в работе [1] с использованием смешанного целочисленного линейного программирования исследуются вопросы оптимальных характеристик водородных установок и заправочных станций для обеспечения гражданских объектов. Оптимальные размеры водородных аккумуляторов также исследуются в [7]. Оптимизации водородной энергетики в техническом плане используются новые экспериментальные методы [2]. С помощью математического программирования в работе [4] исследуется оптимальный баланс между размещением, распределением, хранением, производством, безопасностью и назначению персонала водородных установок. В других исследованиях масштаб объектов увеличивается, они сосредоточены на размещении, распределении и хранении водородных энергетических сетей. Ряд исследований направлены на планирование энергосистем, как на основе водородной энергии, так и с ее участием в

комбинации с другими видами [6, 5]. Анализ масштабного вопроса влияния водородной энергетики на экологию заняты сравнительно небольшое число публикаций, например, [3].

Отклонения экономических показателей из-за развития водородной энергетики исследовались мало. Между тем такие отклонения трудно предсказуемы экспертами, тогда как контроль их необходим для поддержания рационального и стабильного развития государства. Важность экономических показателей и их отклонений подчеркивалась в многочисленных работах на протяжении большого количества лет. В последние годы вопрос исследуется в ключе новых быстро меняющихся реалий и здесь можно отметить ряд работ. В частности, в [8] предлагается анализ динамики интегрального показателя оценки экономической безопасности государства. Этот показатель формируется из выбираемых методом главных компонент наборов прямых и косвенных факторов экономической безопасности, затем выбранные показатели характеризуются с точки зрения возможностей и риска. В [9] разработан метод оценки социально-экономической защищенности с применением матричной модели для оценки риска. Оценивается возможность появления конкретной угрозы, уровень воздействия на защищенность государства, длительность и скорость наступления последствий. В работе [10] того же автора для анализа социально-экономической безопасности предлагается использовать трендовые модели. Математическая модель для исследования системной динамики комплекса показателей национальной безопасности, включая экономические показатели, предлагается в работах [11, 12]. Однако в перечисленных исследованиях не учитывается фактор развития водородной энергетики и его влияние на динамику комплекса ключевых экономических показателей. Поэтому необходимы математические модели, методы и алгоритмы контроля отклонения экономики государства от требуемых или ориентировочных значений в связи с развитием водородной энергетики. Задачу, связанную с таким контролем формально предлагается поставить следующим образом.

1 Формальная постановка задачи

Пусть $X_1(a, p, t), \dots, X_n(a, p, t)$ – экономические показатели развития страны, $a(t)$ – вектор параметров среды, $p(t)$ – допустимые управляющие воздействия из множества P , $X_1^*(t), \dots, X_n^*(t)$ – значения показателей, желаемые ЛПР.

Требуется разработать модели и алгоритмы, позволяющие на отрезке времени $[t_0, t_k]$ определить управляющие воздействия, минимизирующие функционал

$$Z(a, p) = \sum_{i=1}^n (|X_i(t_0) - X_i^*(t_0)| + |X_i(t_0 + 1) - X_i^*(t_0 + 1)| + \dots + |X_i(t_k) - X_i^*(t_k)|) \quad (1)$$

при условиях

$$X_i(t + 1) - X_i(t) = f_i(t, X_1(a, p, t), \dots, X_n(a, p, t), a, p), \quad (2)$$

ограничениях

$$C_i(t) \leq F_i(X_i(t), a, p, t) \leq D_i(t), \quad (3)$$

связанных с нормативами и ресурсами функционирования системы, граничных условиях

$$F_i^0(X_i(a, p, t), a, p) = 0, F_i^k(X_i(a, p, t), a, p) = 0, \quad (4)$$

где $f_i(t, X_1(a, p, t), \dots, X_n(a, p, t), a, p)$, $C_i(t)$, $F_i(X_i(t), a, p, t)$, $D_i(t)$, $F_i^0(X_i(a, p, t), a, p)$, $F_i^k(X_i(a, p, t), a, p)$ – заданные на функции, $i = 1, \dots, n$.

2 Концепция решения задачи

Предлагаемая концепция состоит в выполнении следующих этапов.

2.1 Построение модели системной динамики объекта управления

- на основе экспертного анализа традиционных показателей экономики государств, принятой государственной стратегии национальной безопасности, существующих экономических угроз и вызовов определить множество системных переменных в внешних факторов. На основе экспертного анализа определить множество внешних факторов, оказывающих влияние на системные переменные. К внешним факторам модели необходимо добавить фактор развития водородной энергетики и в достаточной мере декомпозировать его.
- для переменных и внешних факторов необходимо определить единицы измерения, источники экспертных оценок и данных статистики по этим переменным, способы вхождения этих переменных в уравнения системной динамики. Таким способом может быть нормирование, при

котором в уравнение входят не сами переменные, выраженные в своих единицах измерения (количество часов, сотрудников, денежных средств и т.д.), а их значения, взятые относительно соответствующих значений в некоторый известный момент времени, например, за начальный год исследуемого периода. В этом случае величина, входящая в уравнение, рассматривается как безразмерная;

- определить причинно-следственные связи переменных системы и внешних факторов на рассматриваемых отрезках времени. Разработать причинно-следственные схемы, отражающие эти взаимосвязи. Связи определяются по корреляционной зависимости рядов соответствующих данных и по экспертным суждениям о физическом смысле происходящих явлений. При этом по результатам проверки адекватности модели связи на одном и том же интервале времени могут быть скорректированы;
- на основе определенных причинно-следственных схем построить причинно-следственные графы и матрицы. Построить разностные или дифференциальные уравнения по принципам системной динамики;
- определить способы решения уравнений, проверки адекватности построенной модели, ее калибровку и настройку на сценарии.

2.2 Использование модели системной динамики объекта управления

- определить множества

$$\bar{X} = \{(X_1^1(t_0), \dots, X_n^1(t_k)), \dots, (X_1^{M(P,a)}(t_0), \dots, X_n^{M(P,a)}(t_k))\}$$

решений уравнений (2) при различных рассматриваемых допустимых вариантах управляющих воздействий $p(t)$, где $M(P,a)$ – конечное число, зависящее от множества управлений P и воздействия среды $a(t)$.

- выбрать множество решений $\bar{X}^* \subseteq \bar{X}$ и множество соответствующих им управлений $P^* \subseteq P$, удовлетворяющих (3), (4);
- выбрать из множества P^* управления, минимизирующие (1). Если множества \bar{X}^*, P^* не пусты, такой выбор всегда можно сделать за конечное число шагов путем перебора, так как эти множества конечны;
- на основании выбранных управлений определить множество рассматриваемых сценариев, выполнить вычислительные эксперименты для анализа этих сценариев и сформировать выводы.

2.3 Математическая модель системной динамики

В предлагаемой концепции модели системной динамики включают комплексы причинно-следственных схем, графов и уравнений, связывающих оцениваемый уровень развития водородной энергетики страны и основные показатели экономического развития стран. Основным объектом для отображения причинно-следственных связей является таблица G , строки которой соответствуют системным переменным, а столбцы – системным переменным и внешним факторам. Каждой клетке G соответствует функция $G_{i,j}(Y_1(t), \dots, Y_m(t), t)$, множество переменных которой может пересекаться с множеством системных переменных, внешних факторов и переменных среды. Функции $G_{i,j}(Y_1(t), \dots, Y_m(t), t)$ принимают значения на множестве $\{0, 1, -1\}$ и показывают влияние переменной или фактора из столбца на переменную из строки при условиях, заданных переменными $Y_1(t), \dots, Y_m(t)$: «1» – вызывает рост, значение «-1» – вызывает снижение, значение «0» – влияние не учитывается в этой модели. Множество значений функций $G_{i,j}(Y_1(t), \dots, Y_m(t), t)$ может быть также и иным (например, лингвистические значения).

Рассмотрим такую структуру для ФРГ. В качестве основных экономических показателей были выбраны величины, характеризующие:

$X_1(t)$ – ВВП и ВНП;

$X_2(t)$ – качество и уровень жизни населения;

$X_3(t)$ – конкурентоспособность экономики;

$X_4(t)$ – производительность труда и другие показатели экономической эффективности;

$X_5(t)$ – стоимость человеческого капитала населения, его качество и производительность;

$X_6(t)$ – встроенность в мировую экономику;

$X_7(t)$ – уровень коррупции;

$X_8(t)$ – положение в ведущих мировых рейтингах;

$X_9(t)$ – финансовые и экономические рейтинги и оценки ведущих мировых рейтинговых агентств;

$X_{10}(t)$ – отраслевая структура экономики, доля сырьевой экономики;
 $X_{11}(t)$ – производство основных видов продукции на душу населения;
 $X_{12}(t)$ – индикатор подлинного прогресса.

В качестве внешнего фактора рассматривалась переменная $X_{13}(t)$, отражающая степень развития водородной энергетики государства.

Приведенная ниже таблица 1 показывает одно из значений динамической причинно-следственной структуры, значения $P_{ij}(X_1(t), \dots, X_m(t), t)$ постоянны на рассматриваемых интервалах времени.

Таблица 1 – Одно из значений динамической причинно-следственной схемы связей комплексных показателей развития страны и влияния на них степени развития водородной энергетики государства на рассматриваемом временном интервале

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
X_1 – ВВП и ВНП	0	+	+	+	+	+	-	0	+	-	?	+	+
X_2 – качество и уровень жизни населения	+	0	+	+	0	0	-	+	+	+	+	+	0
X_3 – конкурентоспособность экономики	+	+	0	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+
X_4 – производительность труда и др. показатели экономической эфф-ти	+	+	+	0	+	0	-	+	0	-	+	+	0
X_5 – стоимость человеческого капитала населения, его качество, производительность	+	+	+	+	0	+	-	0	0	-	+	+	+
X_6 – встроенность в мировую экономику	+	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+	+	+
X_7 – уровень коррупции	-	-	-	0	-	+	0	0	+	+	+	-	+
X_8 – положение в мировых рейтингах	+	0	+	+	+	+	-	0	+	-	+	+	+
X_9 – финансовые и экономические и оценки мировых рейтинговых агентств	+	+	+	+	+	+	-	+	0	-	+	+	+
X_{10} – отраслевая структура, доля сырьевой экономики	-	-	-	-	-	+	+	-	-	0	-	-	+
X_{11} – производство основных видов продукции на душу населения	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	0	+	+
X_{12} – индикатор подлинного прогресса	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	0	+

В таблице значение «+» означает, что рост показателей в столбце вызывает рост показателей в строке, «-» – вызывает понижение, «0» – непосредственное влияние в этом значении схемы не рассматривается, «?» – влияние переменное. Аргумент времени переменных $X_1(t), \dots, X_{12}(t)$ в таблице опущен для краткости записи.

На основе такой схемы для рассматриваемого интервала времени строится система уравнений вида (2) для переменных $X_1(t), \dots, X_{12}(t)$. Переменная $X_{13}(t)$, которая рассматривается как внешний фактор, входит в правые части этих уравнений.

В соответствии с принципами системной динамики, уравнения общий вид

$$\begin{cases} X_1(t+1) - X_1(t) = \Pi_1^+(t)X_{13 \rightarrow 1}^+(t) - \Pi_1^-(t)X_{13 \rightarrow 1}^-(t) \\ \dots \dots \dots \\ X_{12}(t+1) - X_{12}(t) = \Pi_{12}^+(t)X_{13 \rightarrow 12}^+(t) - \Pi_{12}^-(t)X_{13 \rightarrow 12}^-(t) \end{cases} \quad (5)$$

где $\Pi_i^+(t)$ – произведение переменных системы, рост каждой из которых в соответствии с предполагаемыми причинно-следственными связями увеличивает $X_i(t)$; $\Pi_i^-(t)$ – произведение переменных системы, рост которых уменьшает $X_i(t)$; $X_{13 \rightarrow i}^+(t) = X_{13}(t)$, если рост $X_{13}(t)$ вызывает рост $X_i(t)$, иначе $X_{13 \rightarrow i}^+(t) = 1$, $X_{13 \rightarrow i}^-(t) = X_{13}(t)$, если рост $X_{13}(t)$ вызывает уменьшение $X_i(t)$,

иначе, $i = 1, \dots, 12$. Соответственно, если прямое влияние $X_{13}(t)$ на $X_i(t)$ в модели не рассматривается, то $X_{13 \rightarrow i}^-(t) = X_{13 \rightarrow i}^+(t) = 1$.

Полученная система (5) соответствует условию (2) в формальной постановке задачи.

После установления вида условий (3), (4) и функций, выражающих требуемую динамику $X_i^*(t)$ основных экономических показателей поставленная задача может быть решена предлагаемым методом.

3 Обсуждение

Требуемые или ориентировочные значения $X_1^*(t), \dots, X_n^*(t)$, фигурирующие в (1), могут быть определены для моделирования или принятия решений при анализе предшествующих благоприятных периодов развития страны, которые не были связаны с усилением геополитической конфронтации и развитием пандемии COVID-19. Например, в качестве такого периода можно рассматривать промежутки времени до 2014 года и наступивших последующих санкций США, которые неблагоприятно подействовали на все страны Европы. Также значения $X_1^*(t), \dots, X_n^*(t)$ могут определяться из конкурентных соображений.

Влияние пандемии следует учитывать в рассматриваемой модели при определении или оценке значений $a(t)$ – вектора параметров внешней среды. Это влияние негативно сказывается на развитии водородной энергетики, как и на всей энергетической промышленности и, кроме того, вызывает дополнительную нехватку ресурсов для ее развития. В вариациях моделей системной динамики, которые будут строиться в предлагаемой концепции, пандемия может быть также введена и как внешний фактор.

Математическое обеспечение, основанное на предлагаемой концепции, может быть применено при разработке систем поддержки принятия решений. Такие системы будут использоваться в работе экспертных групп при ЛПП различного уровня для генерирования и анализа различных сценариев развития проблемных ситуаций, в тренинговых комплексах и научных исследованиях. При этом исследуемые сценарии могут носить как прогностический характер, так и касаться прошлых событий, варианты развития которых представляют интерес для исследования причин того или иного явления.

Заключение

Разработана концепция управления влиянием развития водородной энергетики на основные экономические показатели государства. Концепция предусматривает решение вариационной задачи, где целевой функцией служит суммарное отклонение показателей от требуемых значений с соответствующими весами, а модель для управления строится на основе системной динамики. Это позволяет отразить сложные разнонаправленные связи между исследуемыми показателями и развитием водородной энергетики.

Литература

1. Azadeh M., Fowler M., Khavas SS., Elkamel A., Roshandel R., Hajimiragha A. Mixed integer linear programming based approach for optimal planning and operation of a smart urban energy network to support the hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy, 2016, vol. 41, Issue 19, pp. 7700-7716.
2. Tian Y., Tian Yu., Zhanqing Qu, Tiankui Guo, Yongmin Shi, Liaoyuan Zhang A new experimental simulation method for the development of non-renewable hydrogen energy // Oil and gas resources, International Journal of Hydrogen Energy, 2019, vol. 44, Issue 11, pp. 5220-5229.
3. Shulga R.N., Petrov A.Y., Putilova I.V. The Arctic: Ecology and hydrogen energy // International Journal of Hydrogen Energy, 2020, vol. 45, Issue 11, pp. 7185-7198.
4. Derse O., Gocmen E., Yilmaz E., Erol R. A mathematical programming model for facility location optimization of hydrogen production from renewable energy sources // Energy sources part a-recovery utilization and environmental effects, 2020.
5. Guangsheng Pan, Wei Gu, Haifeng Qiu, Yuping Lu, Suyang Zhou, Zhi Wu Bi-level mixed-integer planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering leveled cost of hydrogen // Applied Energy, 2020, vol. 270, 115176.
6. Zhou S., He D., Zhang Z., Wu Z., Gu W., Li J., Li Z., Wu G. A Data -Driven Scheduling Approach for Hydrogen Penetrated Energy System Using LSTM Network // Sustainability, 2019, 11(23), 6784.
7. Mubbashir A., Ekström J., Lehtonen M. Sizing Hydrogen Energy Storage in Consideration of Demand Response in Highly Renewable Generation Power Systems // Energies, 2018, 11(5), 1113.
8. Levchenko V., Boyko A., Savchenko T., Bozhenko V., Humenna Yu, Pilin R. State Regulation of the Economic Security by Applying the Innovative Approach to its Assessment // Marketing and Management of Innovations, 2019, 4, pp. 364-372.

9. *Shvaiba D. N.* Systematic Analysis of Indicators for Socio-Economic Security // Science and Technique, 2018, 17 (4), pp. 338–343.
10. *Shvaiba D. N.* Trend Models for Analysis of Socio-Economic Security // Science and Technique, 2020, 19 (2), pp. 108–112.
11. *Yandybaeva N., Rezchikov A., Kushnikov V., Ivaschenko V., Kushnikov O., Tsvirkun A.* Mathematical Models, Algorithms and Software Package for the National Security State of Russia // Studies in Systems, decision and control, 2019, 199, pp. 646–659.
12. *Yandybaeva N., Rezchikov A., Gorschkov E., Bogomolov A., Kushnikov V.* Mathematical Models and Algorithms for Forecasting National Security in Training Situational Centers // 2020 13th International Conference «Management of large-scale system development». IEEE, 2020, pp.1-3.