

Стратегии развития ТЭК, сценарии возмущений реализуются изменением по определенным законам значений компонент матриц и векторов, составляющих систему уравнений модели ТЭК. Подобным образом модуль m_2 на основе базовых состояний ТЭК создает выходное множество P , состоящее из возможных состояний ТЭК: P_0, P_1, P_2, P_K .

Ядро модуля m_2 представляет собой несколько десятков скриптов на интерпретируемом языке программирования Lua [15]. Ключевым компонентом m_2 является генератор моделей [16], который создает новое состояние ТЭК. Генератор моделей (рис. 7) управляется набором правил, преобразующих данные сценария развития ТЭК W в векторы и матрицу A уравнений. Исследователь имеет возможность изменять правила преобразования исходной информации.

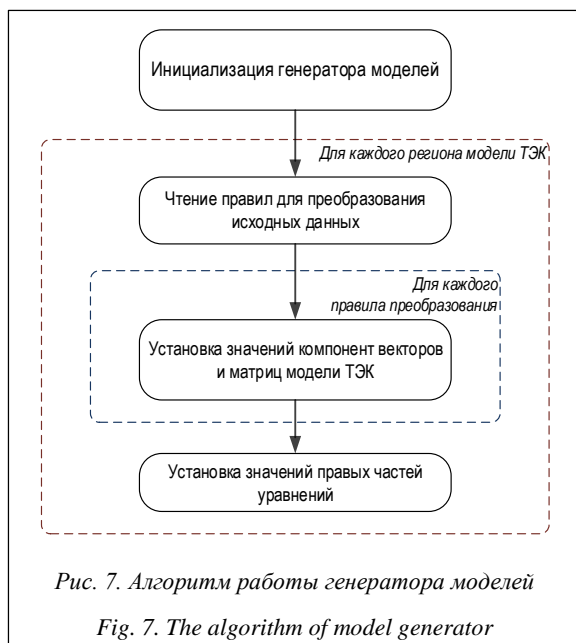


Рис. 7. Алгоритм работы генератора моделей

Fig. 7. The algorithm of model generator

Модуль m_3 проводит оценку допустимости состояния ТЭК из множества P с помощью многоступенчатой системы ограничений. На первом этапе происходит проверка логических условий. На втором этапе осуществляется решение модели ТЭК как задачи линейного программирования. Если решение существует, то далее в случае необходимости на основе результатов решения вычисляются значения индикаторов ЭБ и осуществляется проверка уровня ЭБ.

Результаты работы системы ограничений модуля m_3 , добавляясь к P_0, P_1, P_2, P_K , образуют выходное множество Q , состоящее из проверенных состояний ТЭК Q_0, Q_1, Q_2, Q_K .

Модуль m_4 на основе полученного множества Q_0, Q_1, Q_2, Q_K формирует граф развития ТЭК, содержащий допустимые состояния и переходы, а также множество оптимальных и близких к ним пу-

тей развития ТЭК, с которым далее работает исследователь с целью проведения детального анализа.

После создания графа развития ТЭК каждый его узел является полностью независимым от других с точки зрения проведения расчетов, что обеспечивает возможность организации на данном этапе многовариантных расчетов с параллелизмом по данным [17]. Для организации процесса распределенных вычислений используется инструментальный комплекс DISCOMP [18], ориентированный на автоматизацию разработки и применения распределенных пакетов прикладных программ в разнородных распределенных вычислительных средах.

Моделирование устойчивого развития ТЭК Вьетнама

На базе описанной выше модели ТЭК в период с 2011 по 2015 гг. в ходе совместных исследований, проведенных Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук и Институтом энергетической науки Вьетнамской академии науки и технологий, была разработана модель развития ТЭК Вьетнама [19]. В ней структура ТЭК представлена по восьми агрегированным регионам: дельта Красной реки, Северо-Восточный, Северо-Западный, север Центрального побережья, юг Центрального побережья, Центральное нагорье, Юго-Восточный и дельта Меконга. Входные данные модели включают в себя технико-экономические показатели энергообеспечения (затраты, стоимость и объемы производства, импорта и экспорта), преобразования и транспорта энергоресурсов, потребления энергоресурсов по видам, включая уголь, нефть, газ и электроэнергию.

Институтом энергетической науки с помощью специализированного модуля m_1 программного пакета «Корректива» [20] в 2015 г. были проведены исследования устойчивого развития энергетики Вьетнама и его энергетической безопасности с 2015 по 2030 гг. Варианты развития энергетики формировались на основе шести представительных наборов изменений параметров ТЭК для 2020, 2025 и 2030 гг. Изменению подвергался верхний предел возможностей следующих отраслей ТЭК: добыча угля, добыча природного газа, выработка электроэнергии на ГЭС. Перечисленные параметры менялись в границах от -10% до 10% от исходного значения.

Для оценки устойчивого развития национальной энергетики были выбраны 16 индикаторов ЭБ и 24 критерия устойчивого развития. На их базе с помощью метода анализа иерархий [21] были выбраны четыре варианта развития ТЭК. В результате экспертного анализа наилучшим был признан вариант, где в 2020 г. возможности по добыче угля

снижены на 10 %, возможности по добыче природного газа увеличены на 10 %, а в 2025 и 2030 гг. развитие ТЭК идет по базовому варианту.

Используя те же предпосылки и данные, для формирования и анализа вариантов развития ТЭК Вьетнама были применены алгоритмы комбинаторного моделирования.

На первом этапе на основе исходных данных был создан базовый граф развития ТЭК. На втором этапе для сочетаний отраслей ТЭК и регионов Вьетнама, отмеченных знаком + в таблице, были построены графы развития, подобные графу развития объекта, приведенному на рисунке 8. В узлах графа показаны изменения верхнего предела возможности отрасли ТЭК по отношению к значению, заданному в базовом графе.

Сочетания отраслей ТЭК и регионов Вьетнама

Combining energy sector industries and Vietnam regions

Регион	Добыча угля	Добыча природного газа	Выработка электроэнергии на ГЭС
Дельта Красной реки	+		
Северо-Восточный	+		+
Северо-Западный			+
Север Центрального побережья		+	+
Юг Центрального побережья			+
Центральное нагорье			+
Юго-Восточный		+	+
Дельта Меконга		+	

На третьем этапе был создан граф развития ТЭК, содержащий 531 442 узла. Их обсчет на четвертом этапе проводился в распределенной вычислительной среде, состоящей из вычислительных узлов высокопроизводительного вычислительного кластера «Академик В.М. Матросов» [22].

После расчета на модели ТЭК Вьетнама для проверки уровня ЭБ использовались два региональных индикатора ЭБ: доля собственных источников в балансе котельно-печного топлива и доминирующего ресурса в структуре этого топлива [23].

На пятом этапе на основе критерия минимума затрат на развитие и функционирование ТЭК был выбран оптимальный путь развития ТЭК, предусматривающий для всех перспективных моментов времени увеличение добычи природного газа и снижение добычи угля.

Заключение

Важными преимуществами метода комбинаторного моделирования являются представление вариантов развития объектов и затем системы в

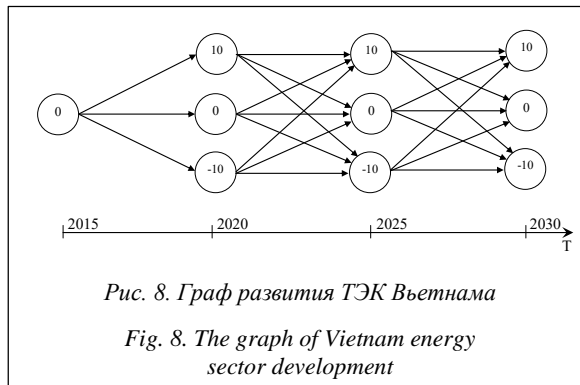


Рис. 8. Граф развития ТЭК Вьетнама

Fig. 8. The graph of Vietnam energy sector development

виде направленного графа, наглядность и компактность в представлении вариантов. Описание в виде графа вариантов наглядно показывает их различия и общие состояния или переходы.

К достоинствам следует отнести достигаемую при этом полноту описания вариантов развития системы. При традиционных способах сравнения вариантов развития, основанных на многокритериальных методах, таких как метод анализа иерархии, исследователи обычно ограничиваются сопоставлением небольшого числа вариантов, выбор которых обосновывается интуицией и накопленным опытом работы. Вместе с тем такой ограниченный выбор, даже если он сделан удачно, всегда отражает некоторую субъективность. Это снижает уровень доказательности получаемых результатов.

Полученные множества допустимых траекторий развития системы могут использоваться во многих постановках задач прогнозирования, в том числе с учетом фактора неопределенности. Среди допустимых траекторий развития системы можно согласно заданным критериям выбирать не только оптимальные пути, но и все множество близлежащих траекторий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-07-07412а.

Литература

1. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. Новосибирск: Наука, 2003. 140 с.
2. Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее; [под ред. Н.И. Воропая, Б.Г. Санеева]. Новосибирск: Гео, 2011. 368 с.
3. Makarov A.A., Mitrova T.A., Malakhov V.A. World energy forecast and consequences for Russia. Studies on Russian Economic Development, 2013, vol. 24, no. 6, pp. 511–519.
4. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. М.: Наука, 1988. 144 с.
5. Ibanez E., & McCalley J.D. Multiobjective evolutionary algorithm for long-term planning of the national energy and transportation systems. Energy Systems, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 151–169.
6. Веселов Ф.В., Макаров А.А., Малахов В.А. Методы и инструментарий прогнозирования развития электроэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 82–94.
7. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Елисеева О.А. и др. SCANNER. Суперкомплекс активной навигации в энергетических исследованиях. М.: Изд-во ИНЭИ РАН, 2011. 144 с.
8. Fishbone L.G., Abilock H. MARKAL, a linear-program-

ming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. Intern. Jour. of Energy Research, 1981, vol. 5, pp. 353–375.

9. Gerking H. Modeling of multi-stage decision making process in multi-period energy models. Europ. Jour. of Operational Research, 1987, vol. 32, no. 2, pp. 191–204.

10. Van der Voort E., et. al. Energy Supply Modelling Package, EFOM-12C Mark I, Mathematical Description. Louvain-La-Neuve, 1984, 429 p.

11. Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure. Computational Management Science, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 7–40.

12. Gatautis R., Ravn H.F. Modelling of energy supply systems by the Balmorel model. Energetika, 2005, no. 2, pp. 8–20.

13. Зоркальцев В.И., Хамисов О.В. Равновесные модели в экономике и энергетике. Новосибирск: Наука, 2006. 221 с.

14. Береснева Н.М., Еделева А.В. Система поддержки исследований энергетической безопасности России // Программные продукты и системы. 2008. № 2. С. 76–78.

15. Ierusalimschy R., de Figueiredo L.H., Filho W.C. Lua – an extensible extension language. Software-Practice & Experience, 1996, vol. 26, no. 6, pp. 635–652.

16. Edelev A.V., Tchemezov A.V., Nguyen Hoai Nam, Doan Van Binh. Sustainable energy development and green growth strategy for Vietnam: a suitable pathway of power sector ensuring the national energy security. Proc. 3th Intern. Sc. Conf. Sustainable Energy Development, Hanoi, 2013, pp. 21–28.

17. Edelev A.V., Sidorov I.A. Combinatorial modeling approach to find rational ways of energy development with regard to energy security requirements. Proc. 6th Conf. NAA'16. Lozenetz, Bulgaria. 2016, Univ. of Rousse Publ., 16 p.

18. Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Разработка и применение распределенных пакетов прикладных программ // Программные продукты и системы. 2010. № 2. С. 108–111.

19. Edelev A.V., Nguyen Quang Ninh, Nguyen Van The, Tran Viet Hung, Le Tat Tu, Doan Binh Duong, Nguyen Hoai Nam. Developing “Corrective” software: 3-region model. Proc. Intern. Conf. Green Energy and Development, Hanoi, Vietnam, 2012, pp. 41–52.

20. Еделева А.В., Пяткова Н.И., Чемезов А.В., Нгуен Хоай Нам. Программный комплекс «Корректива» для исследований долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама // Программные продукты и системы. 2014. № 4. С. 211–216.

21. Sheth N., Hughes L. Quantifying energy security: An Analytic Hierarchy Process approach, Working Paper ERG/200906. Energy Research Group. URL: <http://lh.ece.dal.ca/enen/2009/ERG200906.pdf> (дата обращения: 10.02.2017).

22. Области применения вычислительных ресурсов ИСКЦ. URL: <http://hpc.icc.ru/about/tasks.php> (дата обращения: 10.02.2017).

23. Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М. и др. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 198 с.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.118.172-179

Received 13.02.17

2017, vol. 30, no. 2, pp. 172–179

FORMATION OF VIETNAM ENERGY DEVELOPMENT OPTIONS BY COMBINATORIAL MODELING METHODS

A.V. Edelev¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, flower@isem.irk.ru

V.I. Zorkaltsev¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Laboratory, zork@isem.irk.ru

Đoàn Văn Bình², Ph.D. (Engineering), Director, doanbinh@ies.vast.vn

Nguyễn Hoài Nam², Head of Laboratory, nhnam@ies.vast.vn

¹ Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Lermontov St. 130, Irkutsk, 664033, Russian Federation

² Institute of Energy Science of Vietnamese Academy of Science and Technology, 18, Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội

Abstract. The article describes the combinatorial modelling approach to the research on energy sector development. The idea of approach is to model a system development in the form of a directed graph with nodes corresponding to the possible states of a system at certain moments of time and arcs characterizing the possibility of transitions from one state to another.

The combinatorial modelling is a visual representation of dynamic discrete alternatives. It permits to simulate the long-term process of system development at various possible external and internal conditions, to determine an optimal development strategy of the system under study. The formation and analysis procedures of energy development options are implemented in the Corrective software package. The distributed computing environment are necessary to compute an energy sector development graph.

In 2015, the Institute of Energy Science of the Vietnamese Academy of Science and Technology performed a study of Vietnam sustainable energy development from 2015 to 2030. Data of this study show application of the combinatorial modeling methods to formation and analysis of Vietnam energy development options taking into account energy security requirements. The created Vietnam energy sector development graph consists of 531 442 nodes. It is computed in the cluster located at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science (Irkutsk).

The found optimal way of Vietnam sustainable energy development provides minimum costs of energy sector development and operation.

Keywords: combinatorial modelling, energy development, energy policy, decision support, distributed computing environment.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR, the research project no. 15-07-07412a.

References

1. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. *Metody i modeli razrabotki regionalnykh energeticheskikh programm* [Methods and Models of Regional Energy Program Development]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003, 140 p.
2. *Vostochny vektor energeticheskoy strategii Rossii: sovremennoe sostoyanie, vzglyad v budushchee* [The Eastern vector of Russia's energy strategy: the current state, future outlook]. Novosibirsk, "Geo" Publ., 2011, 368 p.
3. Makarov A.A., Mitrova T.A., Malakhov V.A. World energy forecast and consequences for Russia. *Studies on Russian Economic Development*. 2013, vol. 24, no. 6, pp. 511–519.
4. Zorkaltsev V.I. *Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funktsionirovaniya sistemy toplivsnabzheniya* [The Methods of Forecasting and Analysis of the Efficiency of the Fuel Supply System Operation]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 144 p.
5. Ibanez E., McCalley J.D. Multiobjective evolutionary algorithm for long-term planning of the national energy and transportation systems. *Energy Systems*. 2011, vol. 2, no. 2, pp. 151–169.
6. Veselov F.V., Makarov A.A., Malakhov V.A. Methods and tools for predicting the power system development. *Izv. RAN. Energetika* [Proc. of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2010, no. 4, pp. 82–94 (in Russ.).
7. Makarov A.A., Veselov F.V., Eleseeva O.A. *SCANER. Superkompleks aktivnoy navigatsii v energeticheskikh issledovaniyakh* [SCANER. Super Complex of Active Navigation in Energy Researches]. Moscow, ERI RAS Publ., 2011, 144 p.
8. Fishbone L.G., Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. *Int. Jour. of Energy Research*. 1981, vol. 5, pp. 353–375.
9. Gerking H. Modeling of multi-stage decision making process in multi-period energy models. *European Jour. of Operational Research*. 1987, vol. 32, no. 2, pp. 191–204.
10. Van der Voort E. *Energy Supply Modelling Package, EFOM-12C Mark I, Mathematical Description*. Louvain-La-Neuve, 1984, 429 p.
11. Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure. *Computational Management Science*. 2008, vol. 5, no. 1, pp. 7–40.
12. Gatautis R., Ravn H.F. Modelling of energy supply systems by the Balmorel model. *Energetika*. 2005, no. 2, pp. 8–20.
13. Zorkaltsev V.I., Khamisov O.V. *Ravnovesnye modeli v ekonomike i energetike* [The Equilibrium Model of the Economy and Energy]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006, 221 p.
14. Beresneva N.M., Edelev A.V. A support system of the energy security research in Russia. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2008, no. 2, pp. 76–78 (in Russ.).
15. Ierusalimsky R., de Figueiredo L.H., Filho W.C. Lua – an extensible extension language. *Software-Practice & Experience*. 1996, vol. 26, no. 6, pp. 635–652.
16. Edelev A.V., Tchemezov A.V., Nguyen H.N., Doan V.B. Sustainable energy development and green growth strategy for Vietnam: a suitable pathway of power sector ensuring the national energy security. *Proc. 3rd Int. Scientific Conf. "Sustainable Energy Development"*. Hanoi, 2013, pp. 21–28.
17. Edelev A.V., Sidorov I.A. Combinatorial Modeling Approach to Find Rational Ways of Energy Development with Regard to Energy Security Requirements. *Proc. 6th Conf. on Numerical Analysis and Applications (NAA'16)*. Lozenetz, Bulgaria. 2016, Univ. of Rousse Publ., 16 p.
18. Sidorov I.A., Oparin G.A., Feoktistov A.G. Development and application of distributed software packages. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2010, no. 2, pp. 108–111 (in Russ.).
19. Edelev A.V., Nguyen Q.N., Nguyen V.T., Tran V. H., Le Tat Tu, Doan B.D., Nguyen H.N. Developing "Corrective" software: 3-region model. *Proc. of Int. Conf. Green Energy and Development*. Hanoi, Vietnam, 2012, pp. 41–52.
20. Edelev A.V., Pyatkova N.I., Chemezov A.V., Nguyen H.N. The software package "Corrective" to study the long-term development of the fuel and energy complex of Vietnam. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2014, no. 4, pp. 211–216.
21. Sheth N., Hughes L. *Quantifying energy security: An Analytic Hierarchy Process approach*. Working Paper ERG/200906, Energy Research Group. Available at: <http://lh.ece.dal.ca/enen/2009/ERG200906.pdf> (accessed February 10, 2017).
22. *Oblasti primeneniya vychislitelnykh resursov ISKTs* [Field of Irkutsk Supercomputer Center Computing Resource Application]. Available at: <http://hpc.icc.ru/about/tasks.php> (accessed February 10, 2017).
23. Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M. *Energeticheskaya bezopasnost Rossii: problemy i puti resheniya* [Energy Security of Russia: Problems and Solutions]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011, 198 p.

Примеры библиографического описания статьи

1. Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Доан Ван Бинь, Нгуен Хоай Нам. Формирование вариантов развития энергетики Вьетнама методами комбинаторного моделирования // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 2. С. 172–179; DOI: 10.15827/0236-235X.118.172-179.
2. Edelev A.V., Zorkaltsev V.I., Đoàn Văn Bình, Nguyễn Hoài Nam. Formation of Vietnam energy development options by combinatorial modeling methods. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2017, vol. 30, no. 2, pp. 172–179 (in Russ.); DOI: 10.15827/0236-235X.118.172-179.